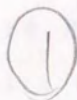


アコースティック・エミッション法による
木材の微視的破壊の進展に関する研究

安 藤 幸 世



アコースティック・エミッション法による木材の微視的破壊の進展に関する研究

Study on propagation of micro-fracture of wood by acoustic emission method.

林産学専門課程 安藤幸世

指導教官 岡野 健

目 次

第1章 序論	1
1.1 緒言	1
1.2 既往の研究と問題点	3
第2章 木材の破壊じん性と基礎的 A E 特性	11
2.1 はじめに	11
2.2 樹種およびき裂進展システムによる相違	12
2.2.1 供試材料	12
2.2.2 実験方法	12
2.2.3 臨界応力拡大係数 (K_{Ic}) の算出	17
2.2.4 結果と考察	18
2.3 含水率の影響	28
2.3.1 供試材料	28
2.3.2 実験方法	28
2.3.3 結果と考察	28
2.4 結論	35
第3章 A E ならびに破壊性状に及ぼすき裂先端の年輪内位置の影響	37
3.1 はじめに	37
3.2 供試材料	39
3.3 実験方法	42
3.3.1 強度試験法	42
3.3.2 A E 計測法	42
3.3.3 走査電子顕微鏡による観察	42
3.4 結果と考察	46
3.4.1 破壊力学パラメータの変動	46
3.4.2 A E 特性	51
3.4.3 破壊じん性と A E との関係	55
3.4.4 破壊面の観察	58
3.4.5 破壊形態と m 値との関係	71
3.5 結論	76
第4章 破壊じん性値の年輪内変動の有限要素法による解析	78
4.1 はじめに	78
4.2 解析方法	80
4.3 実験	83
4.3.1 樹種	83
4.3.2 弾性定数の年輪内分布の測定	83
4.3.3 引張り強さの年輪内分布の測定	85
4.4 結果と考察	91
4.5 結論	96

第5章	A Eならびに破壊性状に及ぼす繊維傾斜の影響	97
5.1	はじめに	97
5.2	供試材料	98
5.3	実験方法	102
5.3.1	強度試験法	102
5.3.2	A E計測法	102
5.3.3	走査電子顕微鏡による観察	102
5.4	結果と考察	103
5.4.1	破壊力学パラメータの変動	103
5.4.2	A E特性	103
5.4.3	破壊面の観察	109
5.4.4	き裂進展開始のメカニズム	112
5.5	結論	117
第6章	A Eならびに破壊性状に及ぼす負荷速度の影響	119
6.1	はじめに	119
6.2	供試材料	120
6.3	実験方法	122
6.3.1	強度試験法	122
6.3.2	A E計測法	122
6.3.3	走査電子顕微鏡による観察	122
6.4	結果と考察	123
6.4.1	破壊力学パラメータの変動	123
6.4.2	A E特性	128
6.4.3	破壊面の観察	128
6.4.4	き裂進展開始のメカニズム	137
6.5	結論	138
第7章	木材ミクロトーム切片の引張破壊過程とA Eの特性	139
7.1	はじめに	139
7.2	供試材料	140
7.3	実験方法	142
7.3.1	引張試験法	142
7.3.2	観察法およびA E計測法	142
7.4	結果と考察	144
7.4.1	破壊の相変化	144
7.4.2	破壊の相変化とA Eの特性	165
7.5	結論	170
	総括	172
	謝辞	177
	文献	178

第1章 序論

1.1 緒言

木材の破壊現象は極めて複雑である。それは木材を構成している種々のレベルでの組織構造単位（ミクロフィブリル構造から年輪構造まで）の幾何学的配列に主に起因していることは明らかであるが、一方、このような巧みな複合構造が、木材の繊維方向における高い破壊じん性の発現に対し大きく寄与していることが近年次第に分かりつつある。それ故に、木材の破壊現象をその組織構造と関連させて究明することは、木材を構造材料として加工、利用する場合には、例えば他材料との複合化等によって木質系材料の特性をより高度に活かした新しい材料の開発・設計を目指す場合においても、その基礎的知見を与えるものとして必要不可欠である。

木材の破壊現象をその組織構造と関連させて究明する手法として、フラクトグラフィー（破面解析）は有効である。最終破断後に観察される壁層、ラメラレベルでの破壊形態の分類法に限れば、これまでのところでほぼ体系的に説明づけられている¹⁾。しかしながら、フラクトグラフィーの本来の目的は破壊機構の解明にある。観察される破壊形態がどのような過程を経て形成されるかについて直接可視化した研究は、ミクロトーム切片で検討した例^{2)・3)}以外は見あたらない。また、木材の破壊過程を、安定してゆっくりと伝播する段階（安定成長段階）から不安定な状態で急速に伝播する段階（不安定成長段階）に移行するという相の変化としてとらえた場合、最終的な破壊面に安定成長段階の進行状況を示すパターンがたとえ現れていたとしてもそれを識別することは難しい。従って、これまでに観察・報告されている木材の破壊面の形態はそのほとんどが不安定成長段階に形成されたものと思われる。単なる破壊面観察の段階から破壊機構解明のためのフラクトグラフィーへと発展を図るためには、もはやフラクトグラフィー単独の検討では限界があり、木材の破壊進展に伴う構造変化をリアルタイムにモニタリングする何らかの動的観察法と併用して研究する必要があると考える。

本論文では、以上のような観点から、動的観察法としてアコースティック・

エミッション (AE) 法に着目し、フラクトグラフィーの手法と併用して検討することにより、特に、これまでほとんど検討されていなかった安定き裂成長時のき裂進展挙動を明らかにすることを目的とする。

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、き裂の進展しにくさを表す破壊力学パラメータの1つである破壊じん性値 (K_{Ic}) と AE との関係について、その関係を概観することを目的とする。そこで、木材の K_{Ic} 値に及ぼす樹種、き裂進展システムの違いによる影響、および含水率の影響を調べ、それぞれについて AE 事象数との関係を検討する。

第3章から第6章では、AE とその発生源での細胞レベルでの破壊形態との関係について検討し、統一的な知見を得ることを目的とする。第3章では、TR き裂進展システムの破壊じん性が、き裂先端の年輪内での位置によって異なったことについて、AE 法および破壊形態の SEM 観察より検討する。第4章では、TR システムの破壊じん性が、き裂先端近傍での応力分布の変化にどのように影響されるかについて、有限要素法による応力解析を行ない、前章での結果を踏まえ、き裂先端の応力集中度と AE および破壊形態との関係について検討する。第5章では、繊維傾斜を変えて破壊じん性試験を行ない、繊維傾斜角の違いによってき裂開始の機構がどのように変化するかを AE 法およびフラクトグラフィーの手法により明らかにし、木材の縦引張破壊時の高い破壊じん性の発現機構を究明する。第6章では、負荷速度の違いにより破壊じん性、AE の特性、および破壊面の性状がどのように影響されるかを検討する。

第7章では、SEM 鏡筒内で切欠き付きマイクローム切片の引張試験を行なって、その破壊過程を直接可視化することにより微視的破壊の進展挙動を明らかにする。同時に破壊過程で発生する AE を計測し、微小き裂の生成および進展と AE との対応づけを行なう。

1.2 既往の研究と問題点

<木材のフラクトグラフィー>

木材の破壊モードと形態については早くから関心がもたれ、まず巨視的に注目を引き¹⁾、ついで光学顕微鏡的に、さらに電子顕微鏡的に観察され、研究されるようになった。そして走査型の電子顕微鏡 (scanning electron microscope, 以後SEMと略す) の出現により研究は著しく進展することとなった²⁾。研究対象は引張破壊^{3, 7)}、曲げ^{8, 9)}、圧縮^{10, 11)}、乾燥^{12, 13)}、切削加工と破壊^{14, 15)}、および接着層^{16, 17)}など多方面にわたるが、本論文に関連する分野 (引張あるいは曲げ) を中心に、これまでの研究成果を概説する。

SEMによる研究は、まず、その実用的見地から繊維化過程における壁層破壊との関連^{6, 18, 19)}に注目して行なわれた²⁰⁾。Korán^{6, 18)}は、black spruceの横引張試験 (接線、放射方向) を $-190^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ の温度条件下で行ない、破壊形を壁横断破壊 (transwall failure) と壁内破壊 (intrawall failure) の2つのタイプに分け、温度の上昇と共に壁横断破壊の出現割合が減少するを見出した。Koránの研究は木材のフラクトグラフィーに関するその後の活発な研究の“引き金”となったようである。

木材の破壊の形態・構造は極めて複雑である。破壊のモード、き裂の進行方向、破壊条件等と、木材自身の組織・構造、構成細胞の壁の構造やその変化が複雑にからみ合う⁵⁾。従って、木材の破壊形態をその組織構造と関連させて研究する必要があったのは当然のことであり、特に針葉樹縦引張破壊については多くの知見が得られている。繊維を横切る破壊は壁の薄い早材仮道管に多く見られる^{7, 21)}が、厚壁の晩材仮道管ではS2層のフィブリル傾角が小さいときにしばしば観察される²²⁾。このような破断面はS2フィブリルとの関連で次の3つに分類される⁷⁾。すなわち、平たん、ひだ状、および、ささくれ状であり、平たんな面は晩材仮道管のS2フィブリルが非常に小さい時にのみ観察され、ひだ状およびささくれ状はフィブリル間の裂けとフィブリルの切断が交互に小刻みに生じて破壊が伝播する場合に生じ、切断が支配的である場合にはひだ状に、裂けが支配的である場合にはささくれ状になると考えられている²²⁾。早材仮道管と晩材仮道管の破壊様式の大きな違いは、早材部では前述した繊維を横

切る破断が数多く見られるのに対し、晩材部では仮道管に沿って部分的に引き抜けた破壊が数多く観察される^{2,21}点にある。この原因としては、早材仮道管は薄壁であるため細胞間層を介して結合している隣接細胞の反対方向傾斜のS2フィブリルの制約を受けた挙動を示すのに対し、晩材仮道管は小径、厚壁であるので細胞壁の横断面積の割には周囲の細胞との結合面積が小さくそれらの影響を受けにくいと考えられており^{2,22}、晩材仮道管で主に出現するこのような剥離破壊は、気乾材の場合、S1内で生じることが確認されている^{2,71}。

木材の細胞壁中において、破壊がどこから始まるのかについては古くから関心が払われてきた。まず、細胞壁における応力解析が試みられ、横引張（接線方向）においてはI+P層の放射壁から湾曲部へ移行する付近あるいはS3が指摘され^{2,23}、縦引張においてはS1内部が指摘された^{2,41}。その後、縦引張破壊の場合についての研究は、単離した仮道管の引張試験により行なわれ、開始点はS1内部ではなく、S2内で生じ²¹、しかも、放射組織との交差域^{2,25}あるいは有縁壁孔付近^{2,26}から生じることが確認された。一方、横引張時の破壊始点についての研究は、試みられてはいる^{2,71}が未だ明らかにされていない。

観察される破断面の性状に対する温度の影響は大きい。壁横断破壊は低温時の破壊に多く、高温では減少する^{6,18,28,29}。壁内破壊は、普通、S1の外縁あるいはS1-P境界を剥離面として起こるが、高温ではさらに外側に移行し、PあるいはP-I境界で剥離する^{6,18}。一方、水分単独の影響については、単離した仮道管の引張試験において含水率の高い場合（飽水状態）には細胞壁の破壊様式が切断破壊から裂け破壊を主体とした様式に変わったとした知見が得られている²¹のみで、重複した細胞、すなわち、繊維軸の回りのねじれによるせん断変形が拘束された状態での影響については明確な知見は得られていない。

荷重速度の影響についてのSEMレベルでの直接的な研究は限られているが、負荷時間が長い場合は細胞間での破壊が指摘され³⁰、衝撃荷重の場合は晩材仮道管においてS2の平たん面破壊が増える⁷¹とする見解が得られている。

SEMの観察上の工夫もなされ、ステレオ解析法による破壊面の定量的評価法が検討されている³¹。

以上述べてきたのは破壊後の観察、いわゆる静的観察による研究成果であるが、動的、連続的な観察も、単繊維の引張破壊^{2,26,32,33-39}、マイクローム

切片の引張破壊^{2,3,40)}および、断片的な研究ではあるが厚手の木材の引張⁴¹⁾、曲げ^{42,43)}破壊について行なわれ、また、レプリカ法による破壊過程の連続的観察⁴⁴⁾も検討されている。

木材の破壊の発達段階は、き裂の発生 (nucleation)、開始 (initiation)、進展 (propagation)、そして、不安定破壊 (unstable fracture) という相の移行として捉えることができよう。木材はいくつかの不定形な構成要素が複雑に結合した複合材料である。従って、木材中には、き裂を発生させ、あるいはき裂の進展を一時的に拘束し不安定破壊を引き起こすような応力集中源、言い換えれば細胞配列上の特異点が存在する。針葉樹材では力の作用する方向あるいは破壊の進行方向が同一方向の時、この特異点として、仮道管と放射組織との交差域および仮道管先端の2ヶ所を挙げることができる²²⁾。この見解は破壊後の静的観察結果^{14,25,44-47)}より導き出されたものであるが、単繊維^{2,26,36)}およびマイクローム切片⁴⁰⁾の動的観察により明確になった。

古川^{2,36)}は、SEM鏡体内での木材単繊維の縦引張破壊時の細胞壁中におけるき裂の挙動を直接可視化し、き裂は放射組織との交差域の細胞壁あるいは分野壁孔を横切るようにして開始し、続いてフィブリル間を引き離すような裂けを主とする破壊へと変化することを明らかにした。この際、S2破壊部を詳細に観察した結果、木材の破壊形態は、フィブリルの切断破壊またはフィブリル間の裂け破壊がどのような応力の種類 (引張応力とせん断応力) で起こるかによって説明できることを見出し、この点を考慮して破壊形態を6つ (C-I, C-II, C-III, S-I, S-II, S-III) に類別している。

古川^{2,3)}は、切欠き付き切片 (60~120 μ m厚) の破壊過程を光学顕微鏡で観察し、以下のことを明らかにした。その破壊過程では3つの特徴的な破壊段階、すなわち、き裂の発生段階と緩徐き裂伝播 (SCP) 段階と急速き裂伝播 (RCP) 段階が存在する。き裂の伝播様式は早材、早材晩材の境界部分および晩材ではそれぞれ異なる。早材切片中では厚さ方向に隣接する細胞との重複細胞壁が同時に切断破壊される。また、早晩材の境界部分の切片中では重複細胞壁の片側の壁中を裂け破壊もしくは切断破壊で進行しているき裂の先端で、隣接細胞壁のS2に裂け破壊を惹起することによって、き裂は隣接仮道管に伝播する。一方、晩材切片ではき裂が伝播する途中で重複細胞壁間に剥離破壊が生じ

るとしている。この剥離破壊は特に晩材部においてよく観察される^{7, 49)}ことは前に述べた。Cookら⁴⁹⁾は、モード I のき裂の先端近傍の応力分布を調べたところ、先端近傍でき裂面に垂直で剥離し易い界面が存在すれば、このような界面はき裂が到着する前に剥離する可能性のあることを指摘している。このような剥離がき裂先端の応力を緩和する要因となっていると考えられている^{50, 51)}ことは興味深い。また古川は、SCP破壊はS2の裂け破壊とS1近傍での剥離破壊で進行するのに対し、RCP破壊では剥離破壊はほとんど観察されず、S2の裂け破壊と切断破壊で進行すると報告している。このことはSCP段階とRCP段階ではその破壊様式が異なることを意味し、これまで木材の分野で観察・検討されてきた破壊面はそのほとんどがRCP段階で形成されたものと思われること、および、それらを区別しないで検討している場合が多いこと、等から注目される。

以上、木材のフラクトグラフィーに関する研究成果を概説したが、針葉樹の壁層、ラメラレベルでの破壊形態の分類法に限れば、研究はほぼ完了しているといっても過言ではないであろう。しかしながら、ミクロフィブリルの引張やせん断等による破壊、フィブリルとマトリックスの境界における破壊、マトリックス内における破壊等での破壊形態・構造についてはほとんど知られていない⁵⁾。フラクトグラフィーの本来の目的は破壊機構の解明にあると思われ、動的観察も試みられているが、未だ判然とした説明はなされていない。単一仮道管、ミクロトーム切片で言えた事が数百～数千細胞径に相当する厚さの木材で同様に言えるかどうかは疑問であり、また、観察される破断面の表面とその内部においてき裂の進展状況が異なることは十分考えられる。木材の破壊の速度が大きく、破壊ひずみが小さいことは動的観察（破壊過程の追跡）を一層困難なものとしている。また木材の破壊部に現われる木材自体が持つ構造が極めて複雑であるために、微視き裂の成長過程を示す特徴的なパターンが現われたとしてもそれを識別することは難しく²²⁾、木材においてき裂伝播経路と破断面に現われる“模様”との関係を考察している研究²⁾は数少ない。さらに、焦点深度の深さ、分解能の良さ、測定試料の取扱い易さ等の理由で主に用いられているSEMは、その走査速度に限度がある。

フラクトグラフィーは破壊形を直接可視化できるので破壊過程の解明には極

めて有効な方法ではあるが、以上述べてきたように特に動的観察において限界があるものと思われる。従って、視覚的に捕らえられない微小き裂の発生および成長を検出し、現象の速い破壊過程に伴う構造変化をリアルタイムにモニタリングする何らかの測定が必要であり、それと併用して検討すればかなりの成果が期待できると考えられる。

<木材のアコースティック・エミッション>

アコースティック・エミッション (acoustic emission, 以後A Eと略す) は、固体が塑性変形もしくは破壊する時に超音波を発生する現象、またはこの超音波のことを言うが、この音波は弾性エネルギーの解放によって生ずる弾性波である。すなわち、その計測によって固体内の弾性エネルギーの変化が検出される。材料の変形中に連続的に検出することができるため、材料内の動的構造変化を知るのに有力である。

A Eの最初の研究は木材において行なわれていたことが最近明らかとなった⁵²⁾。岸上⁵³⁾は、1934年当時も盛んに活動していた伊東での地震について、大きな地震と前震、余震との関係をシュミレートするためにスギ、ヒノキ、ハンダ等の板にレコード針を刺し、破壊試験を行ない、大きな破壊の前に小さな振動、すなわち、A Eが発生することを確認した。1950年代になってKaiser⁵⁴⁾は、木材を含む各種材料について引張試験を実施した結果、荷重を増していくときA Eの発生率は塑性域に入ると急増し、ある点で最大値を示し、それ以上では減少することを明らかにした。特に一度荷重をかけてA Eを発生させた後で荷重を取り去ると、再び荷重をかけても前回の応力値を越すまではA Eが発生しないことを発見した。この非可逆的現象は後にKaiser効果と名づけられた。岸上、KaiserらによるA Eの最初の研究が木材を対象としていたにもかかわらず、その後は金属、セラミックスなどの材料を中心として行なわれ、木材のA Eについて関心が払われるようになったのは、'70年代に入ってからのように思われる。木材のA Eの研究分野で最も盛んに行なわれてきたのは、その成果は別として、乾燥^{55, 56)}や切削加工^{57, 58)}についてである。この他にも接着不良の検出^{59, 60)}、素材や木質材料の材料評価^{61, 62)}、腐朽やシロアリによる生物劣化^{63, 64)}等との関連で数多く行なわれている⁶⁵⁾が、ここでは、本研究に関する

木材の“破壊”との関連で、これまでの研究成果を述べる。

木材の破壊過程に伴って発生するA Eに関して、Lord⁶⁶⁾は、firの3点曲げ試験を行ない、全乾材と気乾材とでは相対荷重（破壊荷重を100%）に対するA E計数総数の発生挙動はほぼ同一であり、Kaiser効果は認められるが判然としない。また節は低応力においてA Eを発生させる有力な原因であると報告している。節や“もめ”が低応力下で発生するA Eに大きく影響しているという結果はSatoら⁶⁷⁻⁶⁸⁾によっても報告されている。Dedhiaら⁶⁹⁾は4点曲げ試験により素材、切欠き材などの破壊点の位置標定をA Eで行なった結果、切欠き材では切欠き付近でのA Eの発生が著しいのに対し、素材ではスパンの中央に発生するA Eがやや多いが他の部分はほぼ同程度の頻度であると報告している。中山ら⁷⁰⁾もまた切欠き材は応力集中部分においてA E発生が著しいと報告している。以上の結果より、木材のA Eの発生は、他材料と同様、材料の不均質性に基づいた局所応力集中に支配されていることは明らかである。

A Eの発生機構を主に支配している不均質な構造は、木材の場合、上述した節などの巨視的なレベルから、年輪構造、細胞壁の壁層構造、ラメラ、フィブリルに至る微視的なレベルまで存在している。Morgner⁷¹⁾は、無欠点材の3点静的曲げおよびクリープ試験を行なった結果、クリープのカーブとA E計数総数のカーブは時間に対して一般に同様の推移を示すことを明らかにするとともに、静的曲げ試験の場合破壊荷重の40~50%でA Eが発生し始めたが、このときの応力は細胞壁が破壊する応力に対応していると推測している。Ansell⁷²⁾は、針葉樹の縦引張試験において組織構造の異なる樹種のA Eの特性およびA Eに対する含水率の影響などを検討するとともに、木材のA Eの発生機構について細胞壁構造と関連づけて考察し、A E計数総数が緩やかに増加する場合（slow A E）と急に発生する場合（rapid A E）があり、前者は細胞壁の微小な割れが徐々に開口することにより発生し、後者は放射組織と仮道管との間、早材と晩材との間、ラメラ間に発生するずれ、または仮道管の脆性破壊などの速い破壊現象に対応するとしている。また佐藤ら^{73, 74)}はスギ縦引張試験により発生したA Eを検討し、A E事象率が小さい場合をslow A E、大きい場合をrapid A Eとし、前者は木材中にもともと含まれているミクロなクラックの開口によって発生し、後者は木材の破壊の過程で現れる延性的な性質に対応し、rapid A Eが

多く生じた場合、マクロなき裂が放射方向に年輪を越えて進展する度合いが大きいと考察している。一方、鈴木ら⁷⁵⁾は、スギの柾目板、板目板の二重片持ち梁型試験片のき裂進展時のA E振幅分布を測定し、柾目板の方が大振幅側にピークがあった点に関して、これは引張方向に配列する放射組織の引張切断の影響であると考察している。Ansell、佐藤らおよび鈴木らの考察は木材のA Eがその組織構造に大きく影響されることを示唆するものであるが、推測の域は出ていない。A Eは時間依存性の現象であるので、解放されるエネルギーの生じる時間に支配され、同じ現象でも短時間に解放されると、より大きなA E信号が生じることになる。従って、A E発生機構を解明させるためにはその発生源における状況（破壊の規模、期間、モード）を形態学的に知る必要がある。そのためには発生源をできるだけ特定させる、すなわち、切欠き材で検討するのが最適であるように思われる。

木材において、A Eと破壊力学パラメータとの間には、或る関係がある。破壊力学は、き裂を持つ部材の応力集中と材料の強度、さらにき裂の伝播から破壊に至る過程を研究する学問である。Schniewindら⁷⁶⁾は、ダグラスファーにおいて、荷重とき裂開口変位の関係から求めた破壊じん性値と、A E事象数が50個カウントされたとき（計測条件は不明である）の荷重から求めた破壊じん性値とが高い相関を示すことを報告している。また佐藤ら⁷³⁾は、スギの引張試験において発生するA E事象数は応力の2乗に比例し、これは線形破壊力学の小規模降伏の概念を用いて求めた関係に一致すると報告している。鈴木ら⁷⁷⁾は、ダグラスファーのテーバー二重片持ち梁型試験片により接着層のモードIの破壊じん性とA Eとの関係を検討し、エネルギー解放率とA E計数とが比例関係にあると結論づけている。

以上述べてきたのは曲げあるいは引張についてであるが、圧縮試験時には応力-ひずみ曲線が塑性域に入ってから初めてA Eが発生し始めること⁷⁸⁾、および、疲労試験時にはき裂の進展に直接対応するpeak load A Eとき裂の開閉に伴う材の摩擦に由来すると考えられているclosure A Eが木材においても発生すること⁷⁹⁾が、それぞれ確認されている。

<木材の K_{Ic} >

破壊力学では、き裂先端での力学的環境条件を表わすパラメータの1つとして応力拡大係数(K)を用いる。 K がある限界値 K_{Ic} に達したときにき裂が進展開始すると仮定されている。 K_{Ic} は臨界応力拡大係数、または破壊じん性と呼ばれ、材料の破壊し難さを示す指標である。

K の値は、き裂長さ a 、幅 W 、公称応力 σ の関数であって、

$$K = \beta \sigma \sqrt{a} \quad (1.1)$$

の形に書け、ここで β は a と W の寸法比のみによって定まる無次元の係数である。材質が同一の材料については a や W によって σ は異なる値を示すが、 K の値は理論的に一定となる⁷⁹⁾。木材のような直交異方性材料であっても、等方性材料であると仮定して求めた K の値は、き裂長さ⁸⁰⁾、あるいは試験片の寸法⁸⁰⁻⁸²⁾に影響されないで、 K および K_{Ic} は、木材材料の特性を表わす有効なパラメータであると考えられている。木材におけるモードI(開口型)の臨界応力拡大係数、すなわち K_{Ic} の測定は数多く行なわれている^{80, 83-95)}。

Schniewindら^{80, 85, 86)}は、ヒノキ等を用いてL T, L R, T L, T R, R L, R Tの6つのき裂進展システム(記号の最初の文字は荷重の方向、二番目の文字は切欠きの方向を示す)の K_{Ic} を求めて、比重、温度、含水率の影響を調べている。Sobueら⁸⁷⁾は、木材乾燥中の応力集中を考慮し、T Rシステムにおける K_{Ic} 値と平衡含水率との関係および乾燥過程における K_{Ic} 値と含水率との関係を調べている。Boatrightら⁸⁴⁾は、South African pineの4点曲げにおいて、繊維傾斜の影響を調べている。またSchniewindら^{83, 85)}、Sobueら⁸⁸⁾、Mindessら⁸⁹⁾は、荷重期間や負荷速度の影響を調べている。Pettersenら⁹⁵⁾は、針葉樹T Lシステムの K_{Ic} 値は比重および含水率の関数として予測できると報告している。以上のように木材の特性を考慮して K_{Ic} 値の測定が行なわれている。

切欠き材の場合、切欠き先端の組織構造に大きく影響されると思われる。特にT R, L Rシステムなどは切欠きの方向がR方向であるため著しいと考えられる。しかしながら、これまで行なわれてきた研究はそのことに言及していない。

第2章 木材の破壊じん性と基礎的A E特性

2.1 はじめに

木材の変形破壊過程で発生するA Eを検討し、微視的な、あるいは、巨視的な破壊とA Eとを結び付けようとする研究は、中山ら⁷⁰⁾、Ansell⁷²⁾、佐藤ら^{73, 74, 75)}、鈴木ら⁷⁵⁾によって行われている。その中には、切欠き材を研究対象としたものもある^{72, 75)}が、その例は大変少ない。金属、岩石材料においては、破壊じん性試験において発生するA Eの基礎的研究が、特に1970年代に数多く行われたが、それらの研究⁹⁶⁻¹⁰⁴⁾に共通しているのは、A Eによりき裂開始点を正確に捕らえ、き裂進展に伴うものと、それ以前の塑性域拡大に伴うものに分けて考えようとしていることである。もちろん、木材のような複合材料とは破壊機構が違うので同列に考えることはできないが、A Eがどちらに由来して発生しているかを検討することは、A Eと破壊力学パラメータとの関係を明らかにする上で重要であろう。

A Eの研究対象として切欠き材を用いるメリットは、

①切欠き先端に応力が集中するので、A E発生源を細胞レベルで特定することができる。

②破壊力学パラメータとの関係を定量的に結び付けることが可能である。

等にあるといえる。木材は複雑な構造を有しているが、木材を構成する組織や細胞の形状・配列には一定の方向性がみられるので、その微視的破壊過程で発生するA Eには、その組織構造に対応した挙動が観測されることが期待される⁷⁵⁾。

本章では、木材の破壊じん性とA Eとの関係について基礎的なデータを得、その関係を概観することを目的とした。そこで、木材の破壊じん性が、樹種、荷重方向、き裂進展方向および含水率によってどのように変化するかを調べ、特に、A Eの最も基本的なパラメータであるA E事象数との関係を検討した。

2.2 樹種およびき裂進展システムによる相違

2.2.1 供試材料

樹種は、スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don), ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) およびケヤキ (*Zelkova serrata* Makino) の3樹種を用いた。

試験片はFig. 2-1 に示すような10×25×125mmの片側き裂試験片 (single edge notched specimen, 以後SEN試験片と略す) とした。各樹種ともRL, RT, TL, TR, LT, LRの6つのき裂進展システム (Fig. 2-2) 全てについて試験片を作製した。全ての試験片は、同一個体のできるだけ近接した部位から木取り、システム内およびシステム間での比重のばらつきを少なくするように選別を行った。またケヤキにおいては、き裂先端位置が孔圏外にあるようにした。試験片は20℃, 65% RHの雰囲気ですば十分に調湿した。試験片の概要をTable 2-1に示す。

荷重方法は直径6mmの円孔によるピンローディングとしたが、繊維方向に応力を加えるLT, LRシステムでは、円孔の部分を強化するために、円孔部分の両側にFig. 2-1 (b) のように硬材添木を加力方向に対し繊維方向が垂直になるようにレゾルシノール系接着剤で接着した。添木の寸法は25×25×3mmとした。

切欠きは最初丸鋸で10mmの深さに入れ、さらに、ミクロトームの材送り装置に装着した新しいカミソリの刃 (0.245mm厚炭素鋼) によって1mmのき裂を入れ、最終的に11mmとした。カミソリの刃で導入したき裂長さとその先端位置は、強度試験直前に実体顕微鏡で観察し、測定した。

2.2.2 実験方法

強度試験は、電気油圧サーボ式材料試験機 (島津サーボバルサEHF-EA5型) を使用し、20℃, 65% RHの恒温恒湿室内で、クロスヘッド速度1mm/minの静的引張により行った。ロードセルによる荷重測定と同時にクリップ・ゲージによりき裂開口変位 (crack opening displacement, 以後CODと略す) の測定を行い、共にX-Yレコーダに記録した。

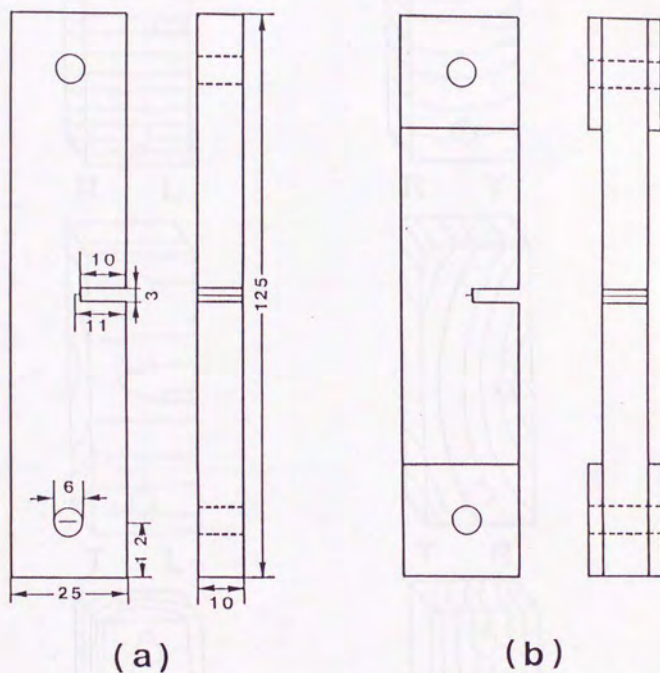


Fig. 2-1. Schematic representations of the single edge notched specimens (unit:mm);

(a).TL, RL, RT, and TR systems; (b).LT and LR systems.

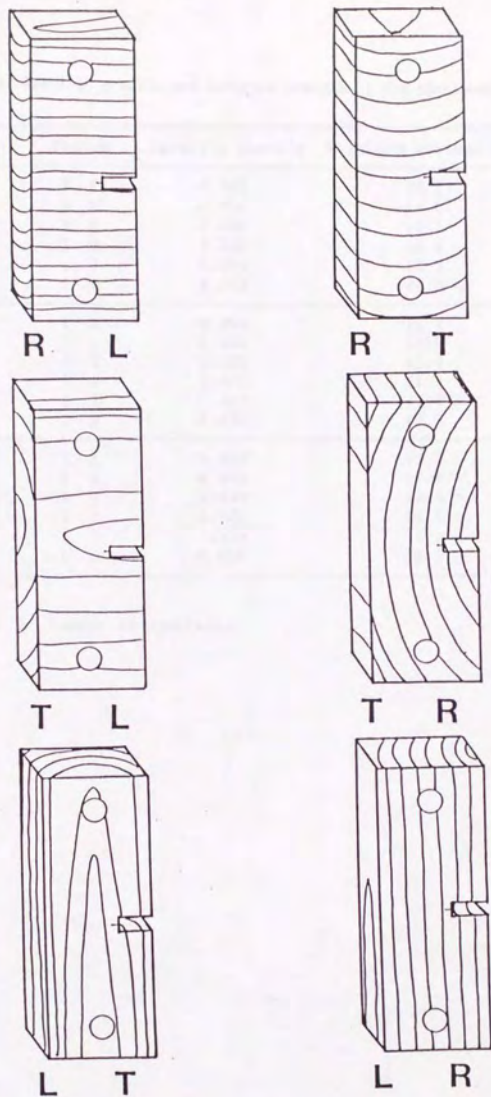


Fig. 2-2. Schematic representations of the six principal crack systems.

Table 2-1. Specific gravity and Moisture content of the specimens.

Species	System	Specific gravity	Moisture content (%)	N
Sugi	T L	0.335	12.1	14
	R L	0.331	13.0	13
	R T	0.335	12.3	13
	T R	0.326	12.8	18
	L T	0.364	12.2	14
	L R	0.373	12.9	14
Hinoki	T L	0.469	12.7	14
	R L	0.465	12.5	13
	R T	0.470	12.2	13
	T R	0.470	12.5	15
	L T	0.453	12.5	14
	L R	0.445	12.2	15
Keyaki	T L	0.650	11.7	15
	R L	0.665	11.5	14
	R T	0.659	11.3	15
	T R	0.631	11.5	15
	L T	0.659	11.9	14
	L R	0.658	11.9	15

Legend: N: Number of specimens.

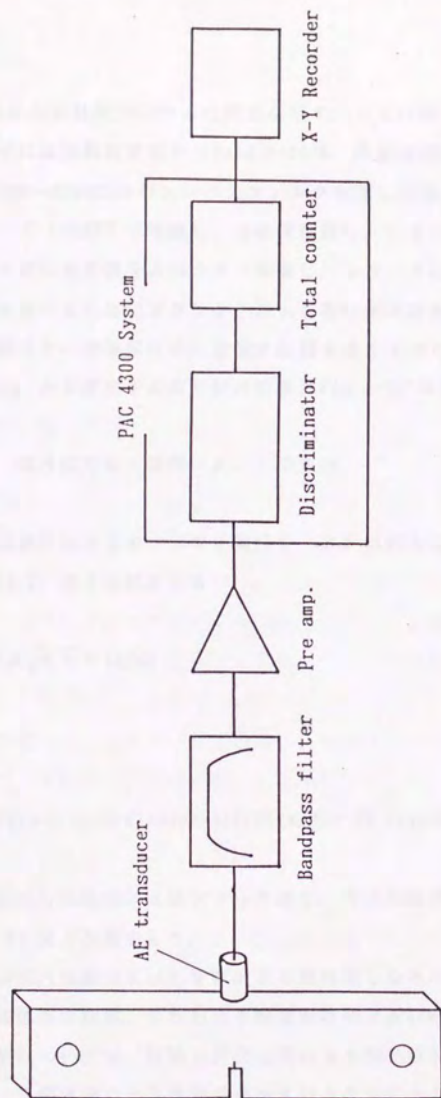


Fig. 2-3. Block diagram of the acoustic emission measurement system.

Fig. 2-3にA E計測システムの概要を示す。A Eの測定にはPAC4300を用いた。A E変換子には差動型変換子 (NAIS, F-217M, 共振周波数200kHz) を用いた。A E波は、100~300kHzのバンドパスフィルタを通した後、プリアンプ (60dB) とメインアンプ (41dB) で増幅し、包絡線検波し、しきい値 (0.8V) 以上の振幅を持つA E波の事象数をカウンタで積算し、レコーダに記録した。しきい値は、外部雑音を避けるためにブランクテストを行いその結果より設定した。A E変換子と試験片との接触部には、音波の伝播を良くするためにシリコングリスを塗布した。A E変換子の取り付け位置はFig. 2-3に示した通りである。

2.2.3 臨界応力拡大係数 (K_{Ic}) の算出

SEN試験片によるモードI (開口モード) の応力拡大係数 (K_I)、すなわち K_I は (2.1) 式で近似される¹⁰⁵⁾。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F(a/W) \quad (2.1)$$

ただし

$$F(a/W) = 1.12 - 0.231(a/W) + 10.55(a/W)^2 - 21.72(a/W)^3 + 30.39(a/W)^4 \quad (2.2)$$

ここで、 σ は公称応力、 a はクラック深さ、 W は試験片幅である。本実験の K_I は (2.1) 式より算出した。

臨界応力拡大係数 (K_{Ic}) を算出する際問題となるのは、き裂が進展し始めようとする臨界の状態、すなわちき裂進展開始 (crack initiation) の確定である。これについては、試験片表面に現れるき裂先端部に導電性塗料を塗り電流を流し、き裂進展により電流が遮断されることにより検知する方法⁸³⁾があり、木材の乾燥の際の割れの検知にも採用されている¹⁰⁶⁾が、木材の場合、き裂進展に際し、試験片の厚さ方向表面でき裂が進展するのに先んじて、試験片内部で進展し始めることが確認されており⁸⁴⁾、この方法は正確な方法とはいえない。Boatrightら⁸⁴⁾は、超音波パルス速度法により求めたき裂進展開始の時刻が荷

重-COD曲線の比例限度の時刻とほぼ一致すると報告している。またSch-niewindら⁸⁵⁾も、LTおよびLRシステムにおいて、き裂進展開始が荷重-COD曲線の比例限度と一致するとし、その点の荷重を臨界荷重として K_{Ic} 値を算出している。本実験においては、材表面に現れた安定き裂の開始が荷重-COD曲線の比例限度時あるいはその直後に起こることを、強度試験中にルーペを用いて目視により確認したことから、き裂進展開始時を、全ての条件においてこの比例限度とし、そのときの荷重から(2.1)式より K_{Ic} 値を算出した。

2.2.4 結果と考察

Fig.2-4~Fig.2-6には、それぞれ、スギ、ヒノキ、ケヤキの6システムにおける典型的な荷重-COD曲線およびAE事象総数の推移の例を示す。スギTRシステムは、ばらつきが大きかったために2例(AとB)示した。縦方向2システムと横方向4システムとでは縦軸のスケールが異なっている。

荷重が加わるとCODは直線状に増加し、AEは比較的初期の段階から発生し始めた。AEは材料の微視的な塑性変形に由来して発生するといわれているが、このことから、荷重-COD曲線の比例限度以前にき裂先端部が塑性域に入っていた、すなわち、小規模降伏の状態に移行していたことがわかる。AEはその後連続的に発生するが、荷重-COD曲線の比例限度を変曲点として加速度的に発生頻度が大きくなる傾向がみられた。

金属等では、安定破壊(slow crack growth)および不安定破壊(unstable crack growth)の開始点をAEにより正確に捕らえ、その結果から破壊条件を与える K_{Ic} 、 J_{Ic} 等の値を求める試みが行われており^{98-102,104)}、AE急増点が安定き裂成長開始点に対応していることが多く報告されている^{99,99,104)}。木材では、Sch-niewindら⁷⁶⁾が、AE事象数が50個カウントされたとき(荷重-COD曲線の比例限度)を安定き裂開始点とみなしている。また、Boatrightら⁸⁴⁾は、LTシステムからTLシステムへと繊維傾斜を変えて破壊じん性試験を行い、超音波パルス速度法により求めたき裂進展開始が荷重-COD曲線の比例限度と一致したと報告している。本研究においては、材表面に現れた安定き裂の開始が荷重-COD曲線の比例限度時あるいはその直後に起こることを、

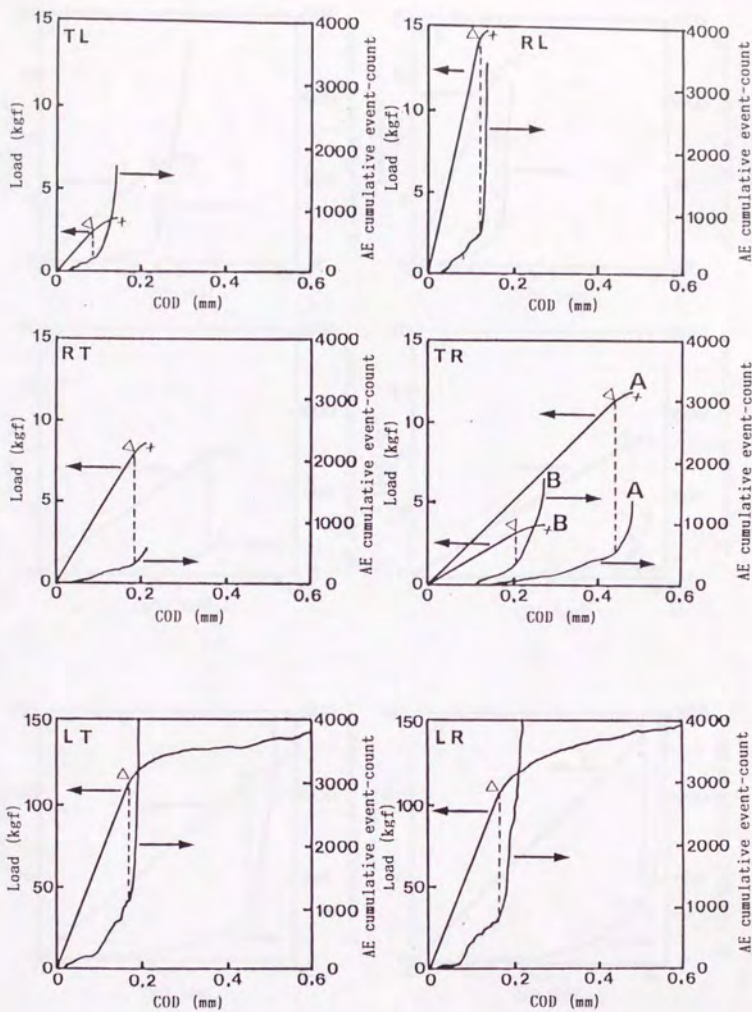


Fig. 2-4. Typical Load-COD diagrams and AE cumulative event-count curves of sugi.

Note: ∇ : Proportional limit.

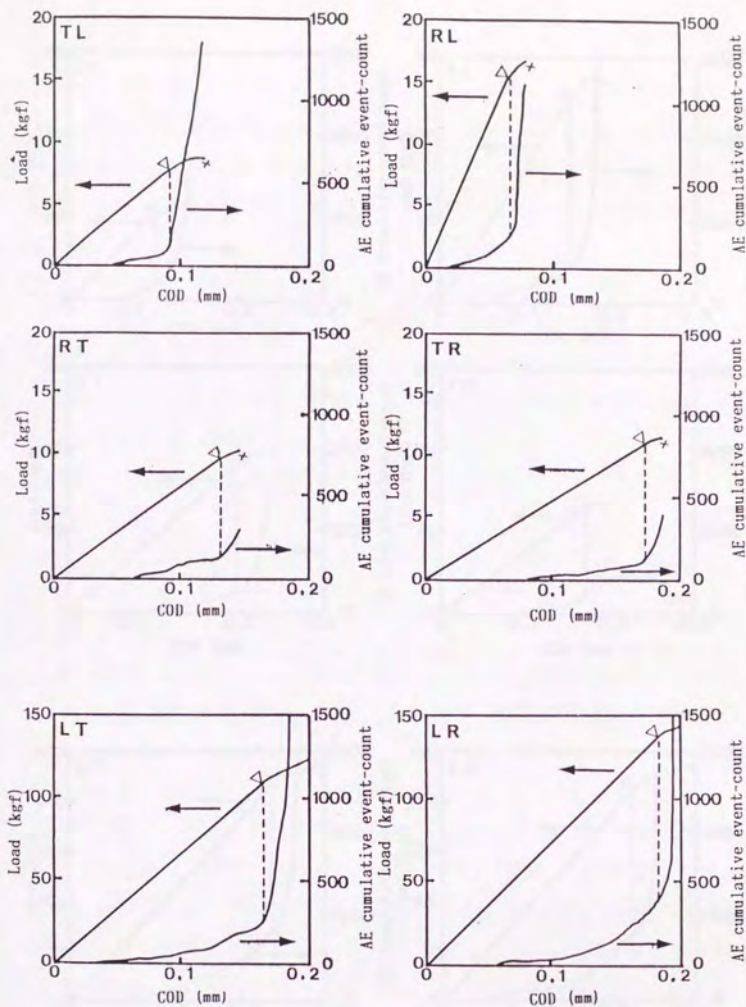


Fig. 2-5. Typical Load-COD diagrams and AE cumulative event-count curves of hinoki.

Note: ▽: Proportional limit.

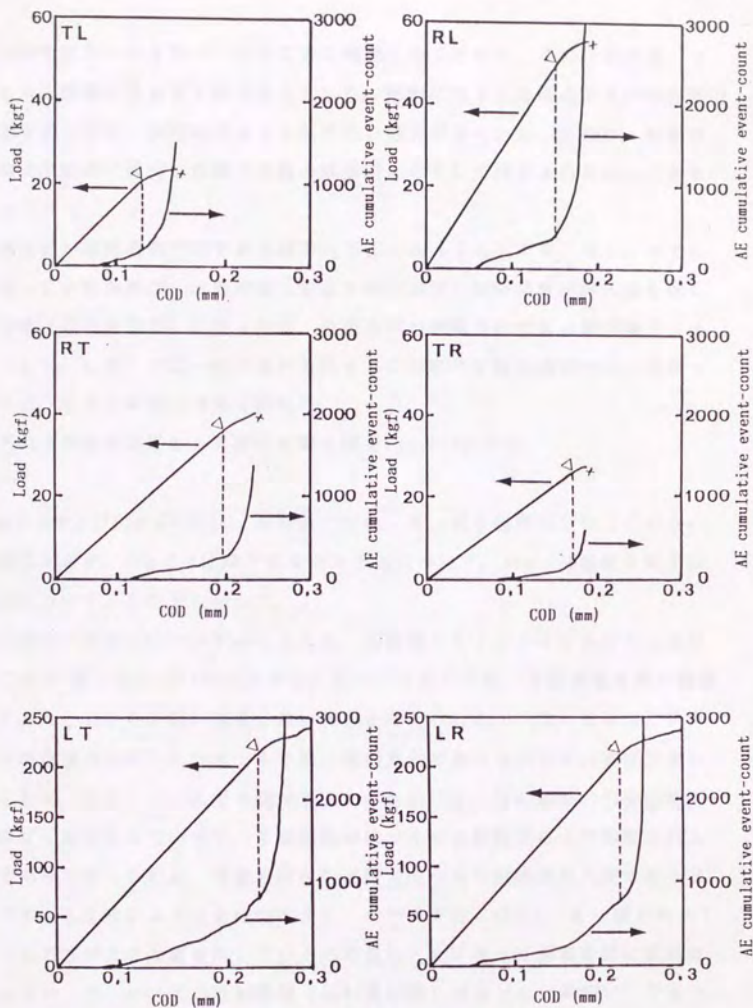


Fig. 2-6. Typical Load-COD diagrams and AE cumulative event-count curves of keyaki.

Note: ∇ : Proportional limit.

強度試験中にルーペを用いて目視により確認したことから、この比例限度、すなわちA E急増点を安定き裂開始点とした。厳密にはA E急増点の方が材表面で観察された安定き裂開始点よりも若干早い傾向があったが、これは、板厚中心部等で局所的に進行した微小き裂の成長がA Eとして検出されるためであると考えられる。

負荷方向が繊維直角方向である横方向システム(T L, T R, R L, R T)の荷重-C O D曲線は、比例限度(安定き裂開始点)以降荷重が最大値を示し最終破断(不安定破壊)に至ったが、負荷方向が繊維方向である縦方向2システム(L T, L R)では一旦き裂が進展すると即座にき裂は繊維方向に曲がってしまい、さらに荷重は増加を続けた。

以上のき裂進展挙動とA E発生概念図をFig.2-7に示す。

Fig.2-8およびFig.2-9には、各樹種ごとに、 K_{Ic} 値と臨界C O D (C O D_c)との関係を示す。Fig.2-8は横方向4システムについて、Fig.2-9は縦方向2システムについて、それぞれ示した。

横方向4システムについてみると、各樹種ともT Lシステムの K_{Ic} 値およびC O D_c値は他の3つのシステムに比べて小さかった。き裂進展方向が繊維方向であることからき裂が進展し易いためと考えられる。一方、R Lシステムは、き裂進展方向がT Lシステムと同じ繊維方向でありながら K_{Ic} 値は大きい。これは、R Lシステムでき裂が進展するためには、放射組織の引張切断を起こさなければならないので、き裂進展開始がその放射組織により抑制されるためであると考えられる。荷重方向き裂進展方向が共に繊維直角方向であるR TシステムとT Rシステムを比較すると、ケヤキではC O D_c、 K_{Ic} 値ともR Tシステムの方が大きな値を示しているのに対し、ヒノキでは両者の間に差異はみられなかった。ヒノキの放射組織(放射柔細胞)はほとんど単列¹⁰⁷⁾であり、その占める割合も小さいのに対し、ケヤキの放射組織は大部分が6~7細胞幅の紡錘形放射組織¹⁰⁷⁾であり、占める割合も大きいので、その放射組織が接線方向へのき裂進展抑制に与える影響が大きいためであると考えられる。スギのT Rシステムは K_{Ic} 値、C O D_cとも大きくばらついた。これは放射方向における材質の変動に影響されていると思われるが、これについては第3章および第

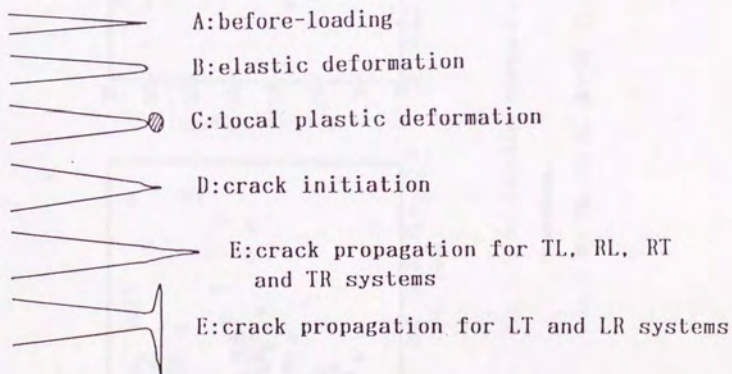
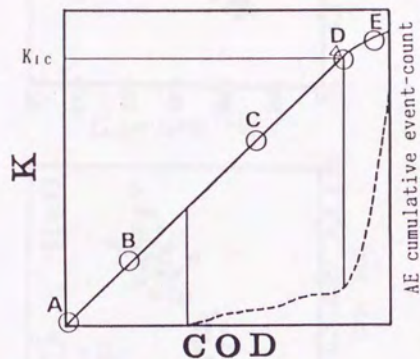


Fig. 2-7. Diagram of the deformation behavior of a crack tip and the AE generation.

Legend: — : K-COD curve.

----- : AE cumulative event-count curve.

▽ : Proportional limit.

Note: K: Stress intensity factor.

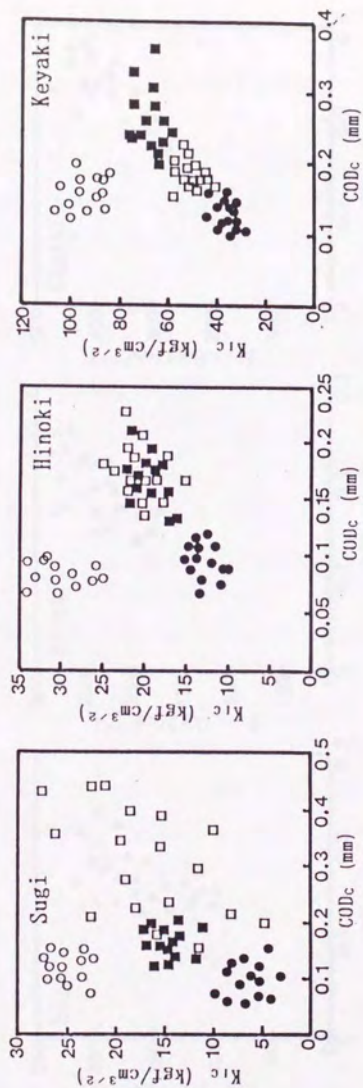


Fig. 2-3. Relationships between K_{ic} and COD_c of TL, RL, RT, and TR systems.

Legend: ● : TL, ○ : RL, ■ : RT, □ : TR.

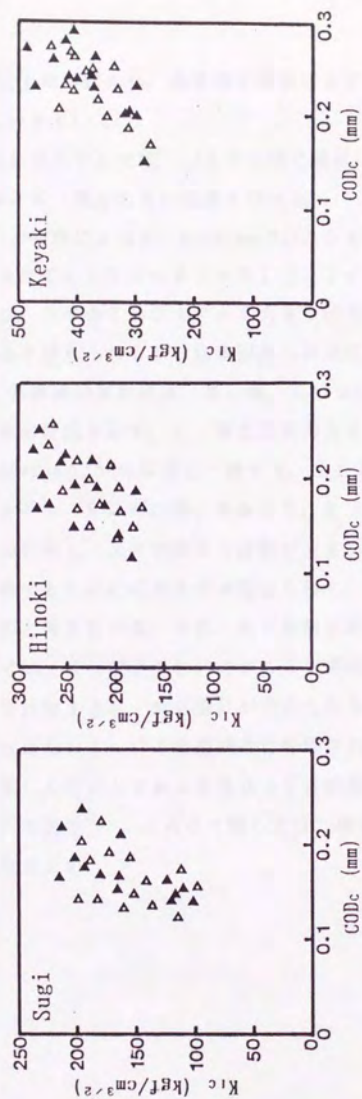


Fig. 2-9. Relationships between K_{ic} and COD_c of LT and LR systems.

Legend: ▽:LT, ▼:LR.

4章で議論する。以上の考察から、各樹種の組織構造が、各システムの K_{IC} 値、 COD_c に影響しているといえる。

Fig. 2-9の縦方向2システムでは、システム間に差異は認められなかったが、 COD_c が大きいほど K_{IC} 値も大きい結果となった。

Schniewindら⁸⁵⁾の報告によると、Douglas-firのSEN試験片での6システムの K_{IC} 値の大きさは $TL < TR = RT < RL$ 《 $LT < LR$ 》となっている。本研究における結果は、スギのTRシステムで大きくばらついた事およびLTとLRの差異がほとんど認められなかった事以外はほぼ同様の傾向となった。

Table 2-2には、各樹種の気乾比重、 K_{IC} 値、 COD_c および K_{IC} 値に至るまでに発生したAE事象総数を示す。 K_{IC} 値は比重の大きい樹種ほど大きい値を示し、これはSchniewindら⁸⁶⁾の報告と一致する。AE事象総数は6システム全てについてスギ、ケヤキ、ヒノキの順に多かった。ヒノキが年輪内での組織構造の変動が少ないのに対し、スギではその変動が大きい。すなわち、スギでは不均一に応力が分布するために応力集中が起こり易く、それがAE事象総数の増加をもたらすものと考えられる。また、AE事象総数と K_{IC} 値との関係については、各樹種内では、 K_{IC} 値が大きい方がAE事象総数が多い傾向が若干みられたが、樹種間で比較すると、何ら関係が認められなかった。従って、AE発生数は K_{IC} 値よりはむしろ、材の組織構造に影響されているという感を著者は得ているが、破壊じん性が大である樹種はAE計数総数が多い傾向があるとする見解も報告されており⁷²⁾、この点に関しては、樹種を増やすなりして今後の研究を待たねばなるまい。

Table 2-2. Specific gravity, K_{IC} , COD_c , and AE cumulative event-count up to the K_{IC} value of specimens.

Species	System	Specific gravity	K_{IC} ($\text{kgf}/\text{cm}^{3/2}$)	COD_c (mm)	AE cumulative event-count	Number of specimens
Sugi	T L	0.335	6.4	0.102	726	14
	(S.D.)	(0.009)	(1.9)	(0.029)	(129)	
	R L	0.331	25.1	0.121	844	13
	(S.D.)	(0.016)	(2.0)	(0.025)	(110)	
	R T	0.335	14.6	0.164	374	13
	(S.D.)	(0.013)	(1.7)	(0.027)	(113)	
	T R	0.326	16.7	0.305	396	18
	(S.D.)	(0.015)	(5.9)	(0.093)	(219)	
	L T	0.364	154.8	0.165	1193	14
	(S.D.)	(0.012)	(31.6)	(0.030)	(235)	
	L R	0.373	160.7	0.174	968	14
	(S.D.)	(0.015)	(39.2)	(0.029)	(118)	
Hinoki	T L	0.469	12.6	0.096	110	14
	(S.D.)	(0.003)	(1.6)	(0.015)	(37)	
	R L	0.465	29.9	0.084	196	13
	(S.D.)	(0.006)	(3.0)	(0.010)	(49)	
	R T	0.470	19.2	0.166	82	13
	(S.D.)	(0.005)	(1.9)	(0.025)	(25)	
	T R	0.470	20.2	0.174	127	15
	(S.D.)	(0.003)	(2.5)	(0.024)	(30)	
	L T	0.453	220.1	0.185	412	14
	(S.D.)	(0.004)	(29.1)	(0.034)	(87)	
	L R	0.445	238.9	0.188	425	15
	(S.D.)	(0.004)	(34.8)	(0.036)	(56)	
Keyaki	T L	0.650	34.6	0.135	352	15
	(S.D.)	(0.008)	(4.4)	(0.028)	(161)	
	R L	0.665	94.2	0.158	402	14
	(S.D.)	(0.009)	(6.9)	(0.023)	(122)	
	R T	0.659	68.3	0.262	208	15
	(S.D.)	(0.008)	(5.1)	(0.043)	(40)	
	T R	0.631	50.6	0.186	218	15
	(S.D.)	(0.012)	(5.0)	(0.020)	(34)	
	L T	0.659	375.3	0.230	839	14
	(S.D.)	(0.016)	(47.3)	(0.030)	(238)	
	L R	0.658	378.2	0.236	708	15
	(S.D.)	(0.014)	(62.2)	(0.035)	(149)	

Legend: S.D.: Standard deviation.

2.3 含水率の影響

2.3.1 供試材料

樹種は均質緻密で材質の年輪内変動が少ないヒノキを用いた。

試験片の形状および寸法は2.2節と同様 (Fig. 2-1) とし、6つのき裂進展システム全てについて試験片を作製した。全ての試験片は、同一個体のできるだけ近接した部位から木取り、システム内およびシステム間での比重のばらつきを少なくするように選別を行った。各システム毎さらに4つに分別し、4種類の含有水分状態に試験片を調湿した。すなわち、全乾状態 (条件A)、気乾状態 (条件B)、繊維飽和点をやや越える含水率状態 (条件C)、飽水状態 (条件D) とした。条件Aの試験片は、 P_2O_5 の塩の結晶を入れたデシケータ中に重量が平衡に達するまで放置して得た。条件Bの試験片は、20℃、65% RHの恒温恒湿室に重量が平衡に達するまで放置して得た。条件Cの試験片は、蒸留水中に浸漬後、 K_2SO_4 の塩の飽和水溶液を入れたデシケータ中に50日間放置して得た。条件Dの試験片は、真空ポンプで蒸留水を減圧注入することにより得た。全ての処理は20℃で行われた。試験片の概要をTable 2-3に示す。切欠きは2.2節と同様にして導入した。

2.3.2 実験方法

強度試験およびAE計測法は2.2節と同様とした。 K_{Ic} 値は荷重-COD曲線の比例限度を臨界点とし、(2.1)式より求めた。

2.3.3 結果と考察

Fig. 2-10に、各システムにおける含水率と K_{Ic} 値との関係を示す。条件Aあるいは条件Bで K_{Ic} 値が最大となる傾向があった。また、繊維飽和点以上の条件CとDの間には、特にRTシステムにおいて著しい差異があった。

Schniewindら⁸⁶⁾は、ヒノキTRシステムのSEN引張試験により、20℃、含

Table 2-3. Moisture content and specific gravity in air dried condition of specimens.

System	Condition	Moisture content (%)	Specific gravity in air dry	Number of specimens
T L	A	3.1	0.456	6
	B	12.7	0.456	6
	C	46.2	0.459	5
	D	226.3	0.457	6
R L	A	3.1	0.458	6
	B	12.5	0.459	6
	C	41.0	0.459	5
	D	205.0	0.458	6
R T	A	3.0	0.455	6
	B	12.2	0.457	6
	C	50.4	0.456	5
	D	214.0	0.457	5
T R	A	3.2	0.458	6
	B	12.5	0.458	6
	C	41.6	0.458	5
	D	205.5	0.459	6
L T	A	1.7	0.438	6
	B	12.5	0.435	7
	C	52.0	0.435	6
	D	187.8	0.431	6
L R	A	1.4	0.439	6
	B	12.2	0.438	6
	C	43.0	0.440	7
	D	175.2	0.438	7

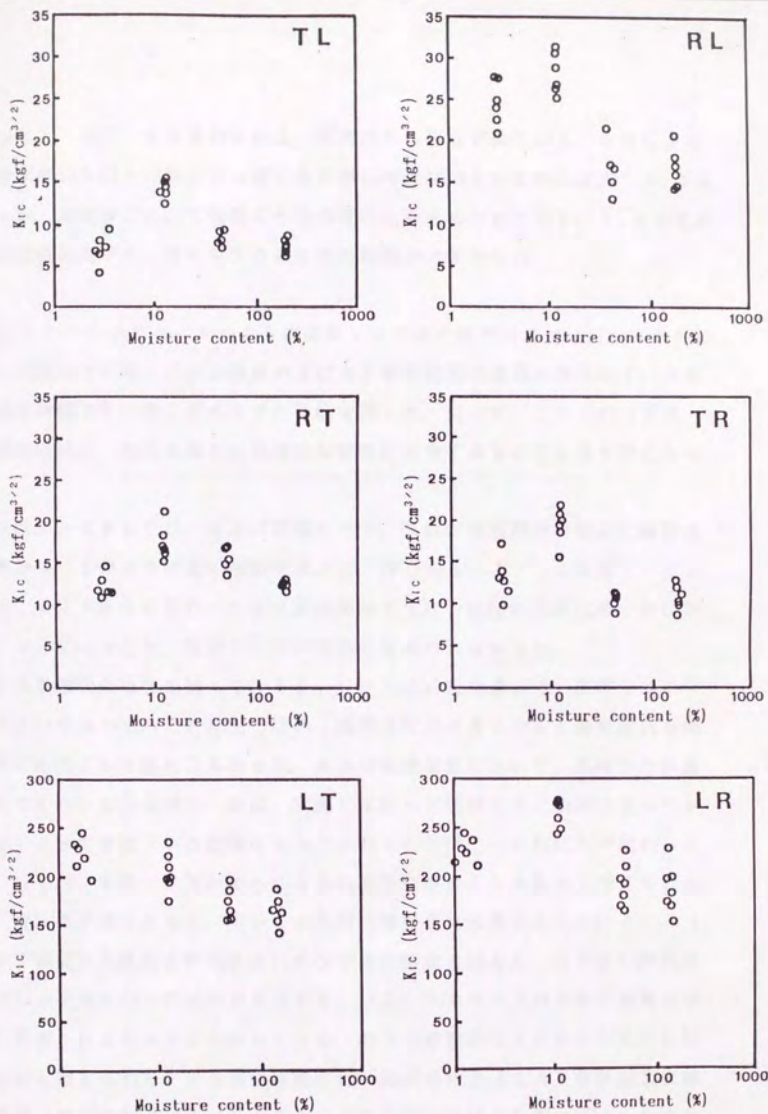


Fig. 2-10. Relationships between K_{1c} and moisture content.

含水率15%と、20℃、含水率30%以上、双方の K_{1c} 値を求めている。それによると、含水率30%以上の材の K_{1c} 値と含水率15%の材のそれとの比は1:1.45であった。本実験において条件Dと条件Bの比を求めたところ1:1.81であり、本実験の方が K_{1c} 値に対する含水率の影響が大きかった。

Fig. 2-11~2-16には、6つのき裂進展システムそれぞれについて、4条件における典型的な荷重-COD曲線およびAE事象総数の推移の例を示す。AE事象総数曲線は K_{1c} 値に至るまでの挙動を示した。従って、ここでのAEは、き裂開始以前の、き裂先端での微視的な塑性に由来するものであると考えられる。

縦方向2システムでは、含水率に関わらず、き裂は進展開始後即座に繊維方向に曲がり、そのまま荷重の増加を続けた。横方向4システムの荷重-COD曲線は、条件Aから条件Cへと含水率が増加するにつれ比例限度以降の伸びが大きくなっていったが、条件CとDの差異は認められなかった。

AE事象総数の推移を調べてみると、6システムに共通して、条件AはCODが小さいうちからAEが発生し始め、臨界点に至るまでのAE事象総数も他の条件に比べてかけ離れて多かった。木材の乾燥状態において、木材中の非晶領域のセルロース分子鎖の一部は、屈曲して歪んだ状態で分子鎖間に生じた水素結合によって固定された状態にあるとされている¹⁰⁸⁾。それに力が加わった場合、分子鎖に不均一に力が加わりAEの発生数が多くなるものと考えられる。一方、含水率が高くなると、水分子が木材内部表面に吸着することにより、(1)分子鎖間の水素結合が切断されてひずみが解放されると、分子鎖の配列度が向上し分子鎖に均一に応力が分布する。(2)セルロース分子間の凝集力が低下し蓄積されるエネルギーが少なくなる。の2つの要因によりAEが発生しにくくなると考えられる。含水率の増加に伴い臨界点におけるAE事象総数は減少するが、繊維飽和点以上である条件CとDの間における差異は認められなかった。このことは、木材の強度性能に与える影響は極めて小さいとされている¹⁰⁹⁾自由水は、木材中を伝播するAEの挙動にも影響を与えないことを示唆するものと考えられる。

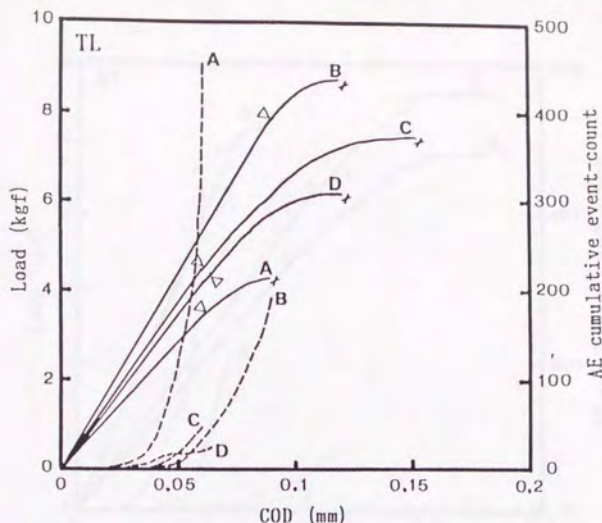


Fig. 2-11. Typical Load-COD diagrams and AE cumulative event-count curves for various conditions of TL system (A-D: See Table 2-3.).

Legend: — : Load-COD diagram.

----- : AE cumulative event-count curve.

▽ : Proportional limit.

Note: AE data were up to the proportional limit in Load-COD diagrams.

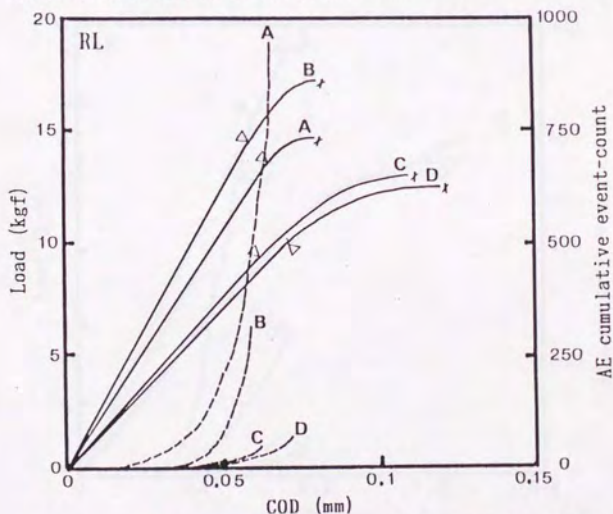


Fig. 2-12. Typical Load-COD diagrams and AE cumulative event-count curves for various conditions of RL system (A-D: See Table 2-3.).

Legend: Same as in Fig. 2-11.

Note: Same as in Fig. 2-11.

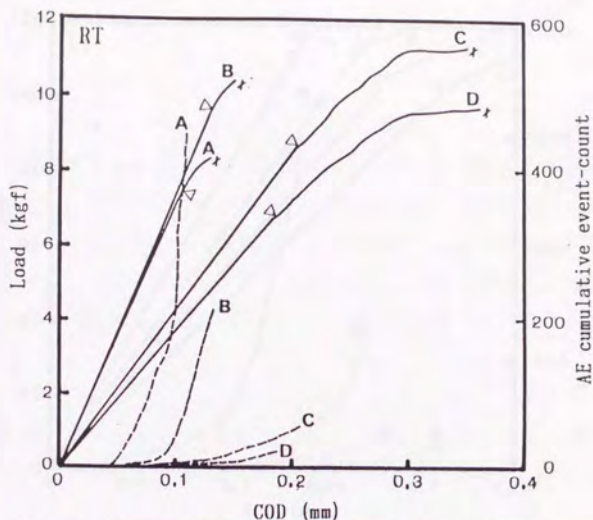


Fig. 2-13. Typical Load-COD diagrams and AE cumulative event-count curves for various conditions of RT system (A-D: See Table 2-3.)
 Legend: Same as in Fig. 2-11.
 Note: Same as in Fig. 2-11.

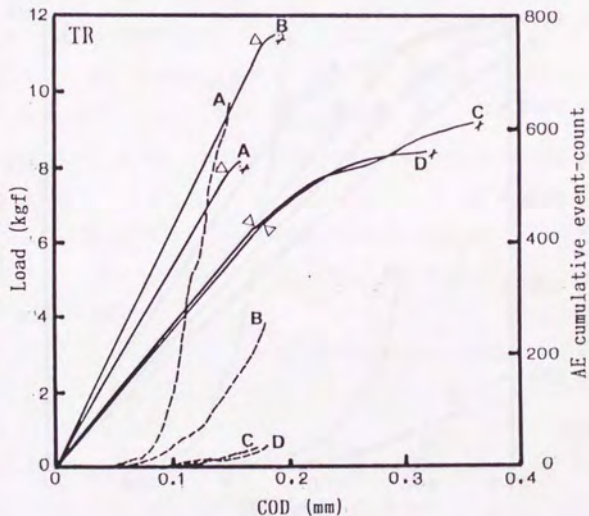


Fig. 2-14. Typical Load-COD diagrams and AE cumulative event-count curves for various conditions of TR system (A-D: See Table 2-3.)
 Legend: Same as in Fig. 2-11.
 Note: Same as in Fig. 2-11.

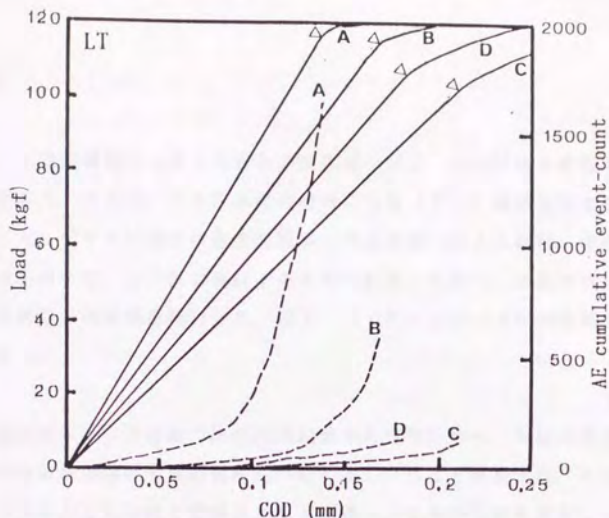


Fig. 2-15. Typical Load-COD diagrams and AE cumulative event-count curves for various conditions of LT system(A-D: See Table 2-3.).
 Legend: Same as in Fig. 2-11.
 Note: Same as in Fig.2-11.

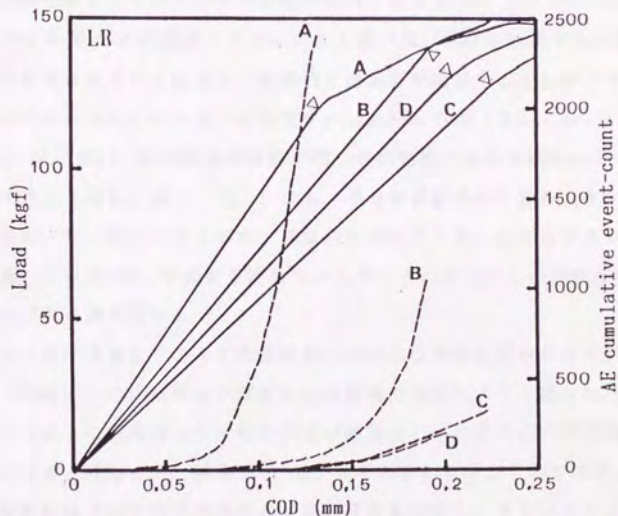


Fig. 2-16. Typical Load-COD diagrams and AE cumulative event-count curves for various conditions of LR system(A-D: See Table 2-3.).
 Legend: Same as in Fig. 2-11.
 Note: Same as in Fig.2-11.

2.4 結論

本章では、木材の破壊じん性とAEとの関係について、その関係を概観することを目的とした。そこで、(1)木材の破壊じん性(K_{1c})値に及ぼす樹種(スギ、ヒノキ、ケヤキ)およびき裂進展システムの違いによる影響、さらに、(2)ヒノキを用いて、 K_{1c} 値に及ぼす含水率の影響、を調べ、それぞれについてAE事象総数との関係を検討した。以下、(1)および(2)の結果に基づいて概説する。

(1) AEは荷重-COD曲線の比例限度以前から発生し始め、木材の場合、比較的初期の段階から微視的な塑性変形が起こっていることが窺えた。また、荷重-COD曲線の比例限度を変曲点として加速度的に発生頻度が大きくなる傾向がみられたが、その変曲点は、材表面で観察された安定き裂開始時にほぼ一致した。従って、この変曲点を正確に捕らえることが、 K_{1c} あるいは J_c 等の値を求めるための新しい手法となる可能性があるといえよう。

K_{1c} 値、 COD_c 値のき裂進展システムによる違いは、木材を構成する細胞の形状、配列等を考慮することにより、定性的ではあるが理解することができた。横方向4システムについていえば、①切欠きの方向がL方向(TL, RL)の場合は COD_c が小さい。②き裂進展開始の際、放射組織の引張切断を起こす必要があるシステム(RL, RT)で、しかも、その放射組織の影響が大きいと考えられる場合、 K_{1c} 値は大きくなる。の2点に要約できた。スギのTRシステムは K_{1c} 値、 COD_c 値とも大きくばらついたが、これについての詳細な検討は第3章および第4章で述べる。

K_{1c} 値と K_{1c} 値に至るまでのAE事象総数との明白な関係は認められなかった。著者は、樹種ごとの組織構造の変動性との関連で説明しようと試みた。すなわち、スギのように組織構造の変動が大きい樹種ほど不均質に応力が分布し、発生数が多くなると考察した。鈴木ら⁷⁵⁾は、スギのRLおよびTLシステムの二重片持ち梁型試験片のき裂進展時のAE振幅分布を測定し、RLシステムの方が大振幅側にピークがあった点に関して、これは放射組織の引張切断の影響であると考察している。本実験で扱ったAE事象数は最も基本的で重要なAE

パラメータであるが、本研究においてさらに詳細な検討を行うためには、A Eのエネルギー分布（振幅分布）を測定する必要がある。

注目すべきは縦方向2システムの破壊じん性値の高さであり、延性金属のそれに充分匹敵する²⁾。それに比べれば横方向4システムの K_{IC} 値はあまりにも小さい。縦方向システムの高い破壊じん性値の発現機構に関しては、Tattersallら¹¹⁰⁾、Gordonら⁵¹⁾、Jeronimidis⁵⁰⁾、Spiegelberg¹¹¹⁾および古川²⁾によって研究されているが、本実験で得られた K_{IC} 値に至るまでのA E事象数が横方向システムに比べて相当多く発生したという点に糸口があるのではないかと著者は考えた。これに関しては、第5章で検討を試みることにする。

(2) K_{IC} 値は、条件A（含水率2.6%）あるいは条件B（含水率12.4%）で最大となり、繊維飽和点以上の条件C（含水率45.7%）と条件D（含水率201.2%）ではほぼ同じ値で低く、無欠点材の引張強さの傾向¹¹²⁾とほぼ一致した。

A E事象総数は K_{IC} 値とは明らかに無関係であった。 K_{IC} 値に至るまでのA E事象総数は、含水率の増加につれて少なくなっていた。これは、無欠点材でA Eを計測した場合の結果と一致する¹¹³⁾。この理由については、①低含水率域における分子鎖の配列度の向上により分子鎖に均一に応力が分布するようになる。②分子内の凝集力が低下し、蓄積されるエネルギーが少なくなる。の2つが考えられた。A E事象総数は、繊維飽和点以上でほぼ一定値となったが、このことは、自由水が木材中を伝播するA Eの挙動に影響を与えないことを示唆するものと考えられた。

第3章 AEならびに破壊性状に及ぼすき裂先端の年輪内位置の影響

3.1 はじめに

木材の微視的破壊の進行状況、微視的破壊型を推定する方法として、従来より破面解析（フラクトグラフィ）が行われており、特に針葉樹材の縦引張破壊については多くの知見が得られている²⁾。しかしながら、木材の微視的破壊現象が極めて複雑であるために未だ判然とした説明がなされていない。破面解析は有効な方法ではあるが、木材が破壊した後か、または破壊が中断した状態でなければ解析ができないので、破壊のプロセスを捕らえることには本来適していない。また、破断面の表面とその内部においてき裂の進展状況が異なることは充分考えられる。従って、視覚的に捕らえられない微小き裂の発生および成長を検出し、現象の速い破壊過程に伴う構造変化をリアルタイムにモニタリングする何等かの測定も必要である。

AEは、固体内の弾性エネルギーの変化として計測され、しかも、変形中に連続的に検出することができるので、材料内の動的な構造変化を知るのには有効なパラメータである。しかしながら、木材のAEが、“どこで”、“どのように”発生するかについては未だ明らかにされておらず、AE法は本来相対的な測定方法にすぎないことを考慮しても、破面解析と関係づけられる程の知見は得られていない。

前章でも述べたように、切欠き材はAEが“どこで”発生するかについては特定させることができるので、“どのように”発生するかについてを中心に検討すればいい。特にTRき裂進展システムについての検討は、木材の乾燥中等に最も脆性的な破壊挙動を示すシステムが対象であるため意義深い。Sobue^{8,7)}は、木材乾燥中の応力集中を考慮し、TRシステムの片側き裂試験片により、 K_{Ic} 値と平衡含水率の関係および乾燥過程における K_{Ic} 値と含水率との関係を調べている。しかしTRシステムに限らず他のシステムにおいても、き裂先端の組織構造に直接言及した研究は行われていない。前章において、スギ、TRシステムの K_{Ic} 値、COD値におけるばらつきが大きかったのは、スギの一年輪内における材質の変動が大きいことに由来する、き裂先端の年輪内での位置の

影響であると考えた。

本章では、A Eと破壊形態との対応づけを試みることを主要な目的とし、スギおよびスギと同様に年輪内での材質の変動の大きいスプールのT Rシステムを用い、一年輪内でのき裂先端位置を様々に変動させることにより、き裂先端の組織構造が、木材の破壊じん性、微視的破壊過程で発生するA Eの特性および最初のき裂先端近傍の微視的破壊形態にどのように影響するか調べた。

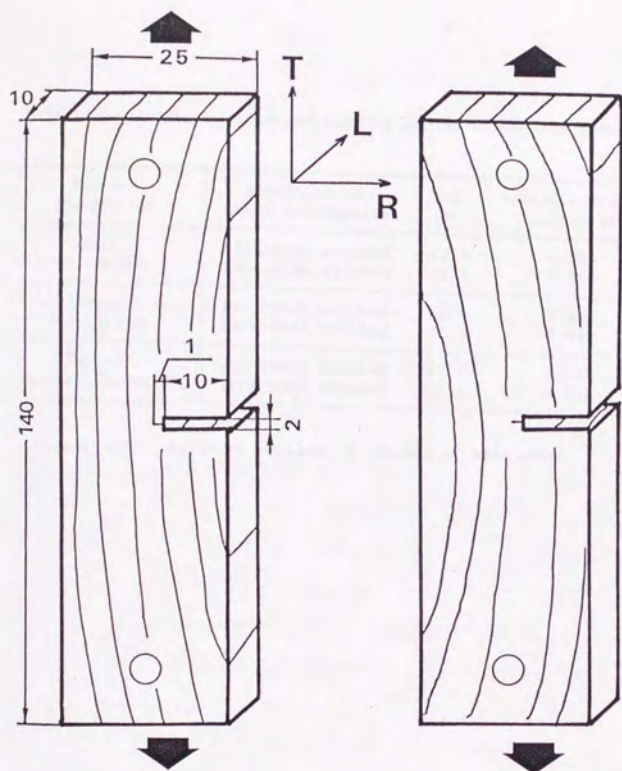
A Eが時間依存性の現象であり、き裂進展時に発生するA Eとそれ以前のき裂先端での微視的な塑性に由来するA Eとは現象の速度が異なることが考えられ、両者を一義的に議論することはできない。従って、本章ではき裂進展開始時までには発生したA Eに研究対象を限定することにした。

3.2 供試材料

供試材料はスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) およびスプルス (*Picea sitchensis* Carr.) の心材部を使用した。試験片は10×25×140mmの片側き裂試験片のTRき裂進展システムとした。き裂先端の放射方向における年輪内位置の影響を調べるために、き裂先端位置が同一年輪内 (スギ: 髄より20年輪目, 年輪幅5.0mm, スプルス: 年輪幅4.1mm) で放射方向に様々に変動するように試験片を作製した。接線方向における年輪内位置は固定した。また, Fig. 3-1に示すように, き裂進展方向が木裏→木表 (pith-side notched) と木表→木裏 (bark-side notched) となる2種類を作製した。

試験片の含水率は, スギでは気乾 (20℃, 65% RH) に, スプルスでは気乾および飽水に, それぞれ調湿した。飽水材は蒸留水を減圧注入することにより得た。切り欠きは最初丸鋸で10mmの深さに入れ, さらにカミソリの刃 (0.1mm厚炭素鋼) によって1mmのき裂を入れ, 最終的に11mmとした。試験片の概要をTable 3-1に示す。

カミソリの刃で導入したき裂長さとその先端の年輪内位置は, 強度試験直前に, 実体顕微鏡または読取顕微鏡で観察, 測定した。そして, 強度試験終了後, 実体顕微鏡下で破壊面を観察し, 確認した。



(Pith-side notched)

(Bark-side notched)

Fig. 3-1. Schematic representations of the specimens (unit:mm).

Table 3-1. Moisture content and specific gravity of the test specimens.

Species (condition)	Direction of crack propagation	M.C. (%)	Specific gravity in air dry	N
Sugi (air dried)	pith-side notched	12.4	0.356	57
	bark-side notched	12.4	0.360	44
Spruce (air dried)	pith-side notched	12.1	0.442	36
	bark-side notched	12.1	0.440	34
Spruce (water saturated)	pith-side notched	230.9	0.443	20
	bark-side notched	245.1	0.439	21

Legend: M.C.: Moisture content, N: Number of specimens.

3.3 実験方法

3.3.1 強度試験法

強度試験法は2.2節と同様とし、クロスヘッド速度1 mm/minの静的引張で行った。

3.3.2 AE計測法

Fig.3-2にAE計測システムの概要を示す。AE計測にはPAC社製3000/3104AEアナライザを用いた。AE変換子には、差動型変換子(NAIS,F-217M、共振周波数200kHz)を用いた。AE波は、100~300kHzのバンドパスフィルタを通した後、ブリアンプ(60dB)、メインアンプ(38dB)で増幅し、包絡線検波し、しきい値(0.7V)以上の振幅を持つAEを計測した。しきい値は、外部雑音を避けるためにブランクテストを行い、その結果より設定した。AE変換子と試験片の接触部には音波の伝播をよくするためにシリコングリスを塗布した。

本実験では、AEデータ取り込みに際し、ガードセンサ機能を利用した。ガードセンサとはAEの到達時間差によって試験片に空間的にフィルタを掛けるために使用される。例えばFig.3-3に示すように、最初にガードセンサ(Fig.3-2, Ch.1, Ch.3)にヒットしたAEはデータとして記録されない。しかし最初にメインのセンサ(Fig.3-2, Ch.2)にヒットしたAEはデータとして記録される。この機能によりき裂先端部以外からのAEを除去した。

AEパラメータとしては最大振幅値を計測し、パルスの発生した時刻とその時点での荷重と共に、フロッピーディスクに記録した。

3.3.3 走査電子顕微鏡による観察

強度試験後の破断面を走査型電子顕微鏡(scanning electron microscope、以後SEMと略す)により観察し、カミソリの刃で導入したき裂先端部の破断後の性状および初期のき裂進展状況を調べた。

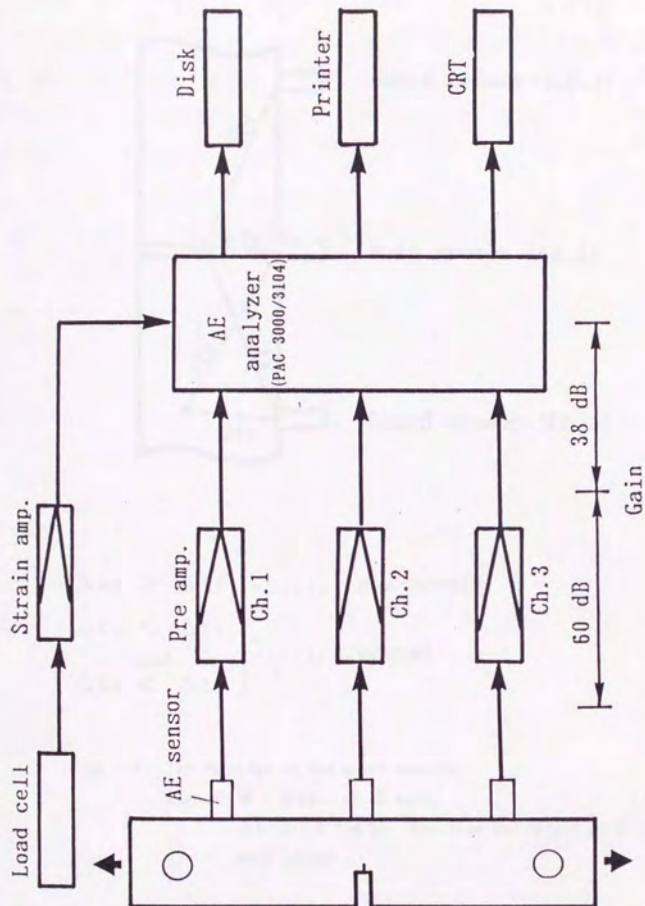
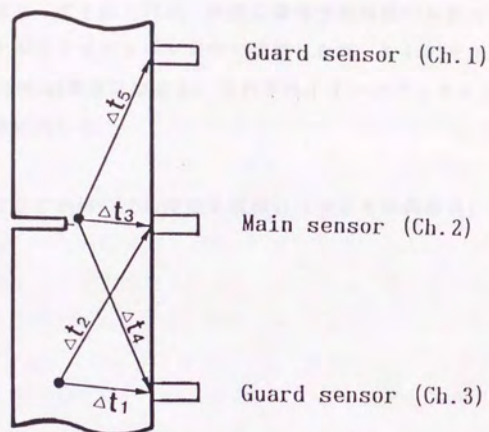


Fig. 3-2. A block diagram of the AE measuring systems.



$\Delta t_2 > \Delta t_1$ non-accept

$\Delta t_3 < \Delta t_4$
 and
 $\Delta t_3 < \Delta t_5$

.....accept

Fig. 3-3. The function of the guard sensors.

Legend: ● : Origin of AE wave,

Δt_i (i=1,2,3,4,5): Time from the origin of AE wave to each sensor.

SEMは、日立S-4000または日本電子JSM-T330Aを用いた。観察用小片を採取し試料台に両面テープで取り付け、周囲に導電性樹脂塗料を塗布した。その後7日間シリカゲル入りのデシケータ中で乾燥した後、S-4000を用いる場合には白金を、JSM-T330Aの場合には金を、それぞれイオンスパッタリング装置で蒸着し、SEM観察に供した。

K_{ic} 値は荷重-COD曲線の比例限度を臨界点（安定き裂開始点）とし、（2.

1）式より求めた。

3.4 結果と考察

3.4.1 破壊力学パラメータの変動

一年輪中のき裂先端の位置は、前年の年輪界からの距離を年輪幅で割った値の百分率で示した (Fig. 3-4)。早材から晩材への移行部分の年輪内位置はスギで約85%、スプルーでは約80%であった。

Fig. 3-5は、スギの“pith-side notched”と“bark-side notched”のき裂先端部の年輪内位置と K_{Ic} 値との関係を示す。 K_{Ic} 値は、安定き裂開始点、すなわち、荷重-COD曲線の比例限度を臨界点として求めたものである。“pith-side notched”では K_{Ic} 値は早材部で小さく、晩材に近づくにつれて次第に大きくなり、晩材部との移行部分でピークに達し、晩材部では小さくなっていき、上に凸の曲線を描くように推移した。一方、“bark-side notched”では、き裂先端が前年との年輪界付近に近い早材部にある場合が K_{Ic} 値は最も大きく、それが早材から晩材へ移行し次年度との年輪界近傍で最も小さくなる、右下がりの傾向を示した。“pith-side notched”と“bark-side notched”に共通して、き裂先端が早材部にある場合、き裂先端からき裂進展方向前方の晩材部までの距離が近いほど K_{Ic} 値の値は大きく、また、き裂先端部が晩材部にある場合、 K_{Ic} 値の値は相対的に小さくなる傾向があった。

Fig. 3-6は、スギのき裂先端の年輪内位置と臨界COD (COD_c)との関係を示す。“pith-side notched”は年輪内位置50%付近を頂点とした上に凸の曲線を描くように推移したが、年輪内位置70%付近から100%までの COD_c の下がり方が急激であった。“bark-side notched”では、単調な右下がりの傾向を示した。

第2章において、スギTRシステムの K_{Ic} 値、 COD_c 値が大きくばらついたが、これはき裂先端の年輪内位置およびき裂進展方向の違いによる影響であったことがわかった。

Fig. 3-7は、スプルーのき裂先端の年輪内位置と K_{Ic} 値との関係を示す。気乾材はスギと同様の傾向であったが、飽水材においては、全体的に気乾材より値が低く、年輪内位置、き裂進展方向 (木裏→木表、木表→木裏)に関わらず

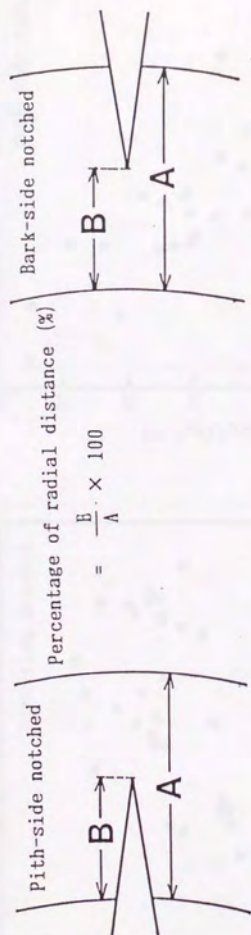


Fig. 3-4. The definition of the percentage of radial distance in this study.

Legend: A : Annual ring width. B: Radial distance from the ring boundary of the last year.

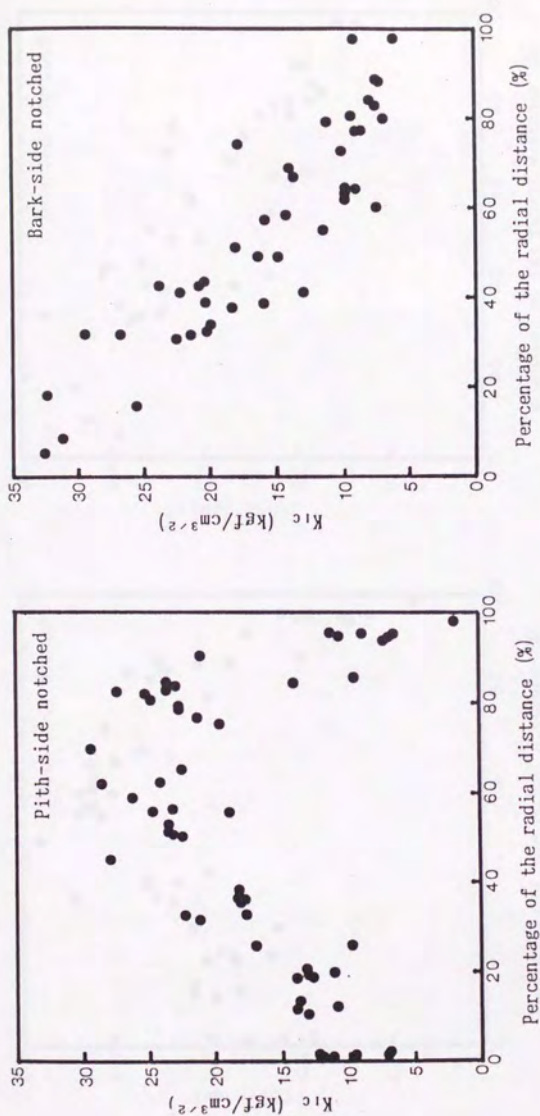


Fig. 3-5. Relationships between K_{Ic} and the location of the crack tip in a single annual-ring of sugi in air-dried condition.

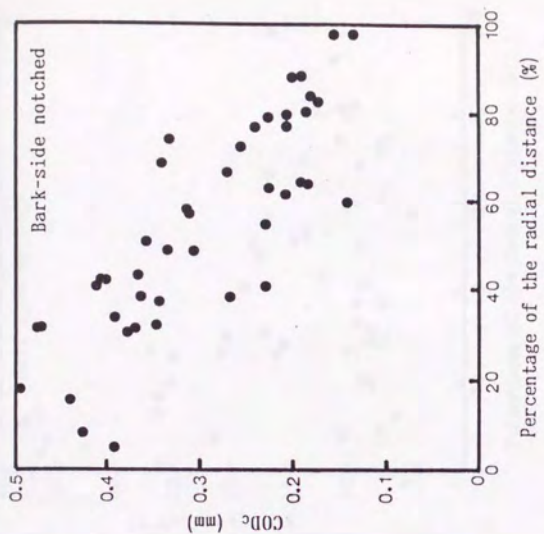
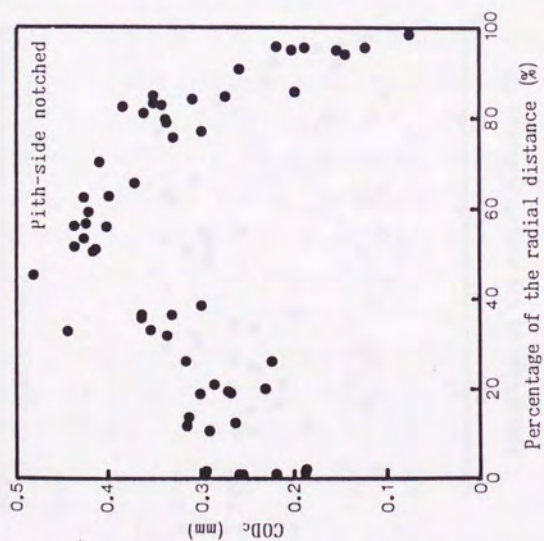


Fig. 3-6. Relationships between CODc and the location of the crack tip in a single annual-ring of sugi in air-dried condition.

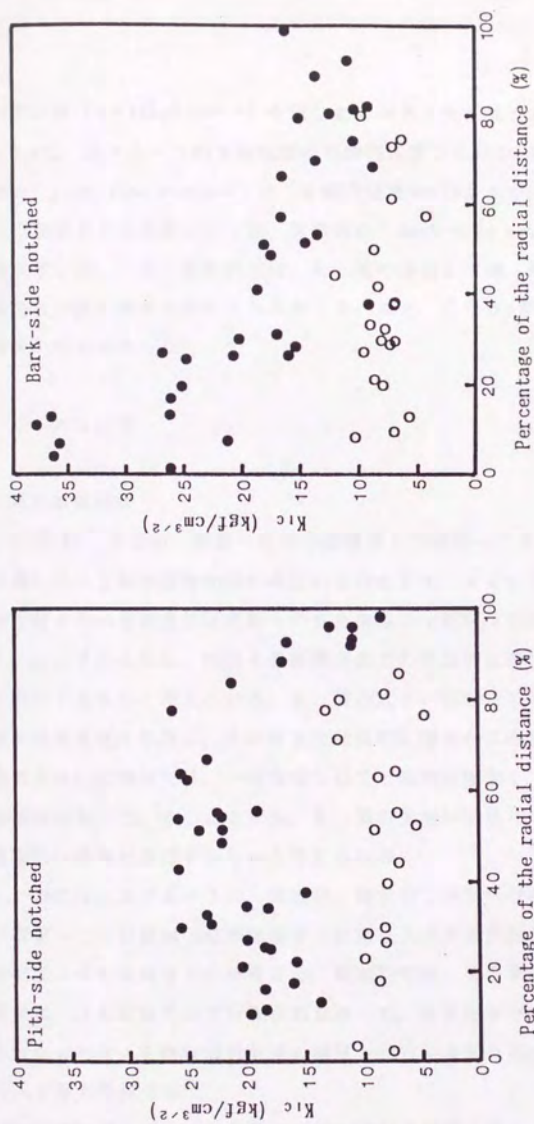


Fig. 3-7. Relationships between K_{Ic} and the location of a crack tip in a single annual-ring of spruce.

Legend: ●: Air-dried condition. ○: Water-saturated condition.

ほぼ一定の値 ($5 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2$) を示したのが大きな特徴であった。

Fig. 3-8は、スプールのき裂先端の年輪内位置とCOD値との関係を示す。気乾材の“pith-side notched”は、年輪内位置0～50%まではほぼ一定値を示しそれ以後減少する結果となった。気乾材の“bark-side notched”は右下がりの傾向を示した。一方、飽水材では、 K_{Ic} 値の場合と同様、年輪内位置、き裂進展方向との間に関係が認められなかった。また、COD値は気乾材と飽水材でほぼ同レベルであった。

3.4.2 AE特性

(a) AE事象総数

Fig. 3-9には、スギの、荷重-COD曲線および荷重-COD曲線の比例限度まで計測したAE事象総数曲線の典型的な例を示す。カミソリの刃で導入したき裂の先端からのき裂進展は荷重-COD曲線の比例限度以降に観察されたことより、ここでのAEは、初期き裂先端近傍での微視的な塑性変形（小規模降伏）に由来するものと考えられる。 K_{Ic} 値の大きい試験片でのAE事象総数は、AE発生開始直後は漸増し、その後2次曲線的に滑らかに増加した。一方、 K_{Ic} 値の小さい試験片では、一旦発生し出すと急激に増加し、そのまま臨界点に至る傾向があった。このことから、 K_{Ic} 値の大きい試験片では、比較的ゆっくり微視的な破壊が進行するものと考えられる。

Fig. 3-10には、スプールの、気乾材、飽水材で典型的な荷重-COD曲線および荷重-COD曲線の比例限度まで計測したAE事象総数曲線の例を示す。気乾材ではスギと同様なことが言えた。飽水材では、第2章のヒノキによる結果と同様に、AEはほとんど計測されなかった。また飽水材の場合、気乾材で認められたようなAE事象総数曲線の推移の仕方におけるばらつきはなかった。

(b) AE最大振幅分布

木材の破壊に際して、AEの発生源での状況を推察することができれば、木材の複雑な微視破壊機構を解明するための手がかりとなると考えられる。一個のAE事象の大きさを表す量としてAE信号の最大振幅がある。横軸に最大振幅値、縦軸に発生数をとったものをAE振幅分布曲線といい、検出されたAE

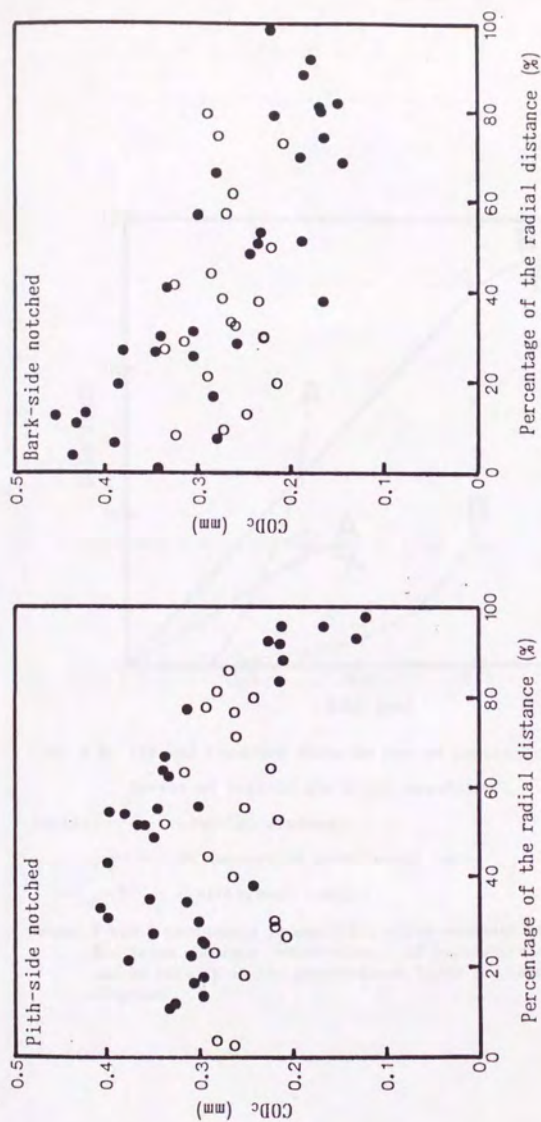


Fig. 3-8. Relationships between COD_c and the location of a crack tip in a single annual-ring of spruce.

Legend: Same as in Fig. 3-7.

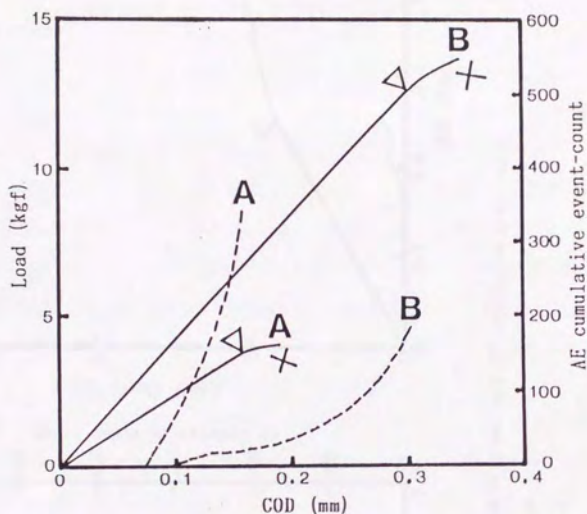


Fig. 3-9. Typical Load-COD diagrams and AE cumulative event-count curves of sugi in air-dried condition

Legend: — : Load-COD diagram.

----- : AE cumulative event-count curve.

▽ : Proportional limit.

Notes: A and B correspond to small K_{Ic} value specimen and large K_{Ic} value specimen, respectively. AE cumulative event-count curves were up to the proportional limit in Load-COD diagrams.

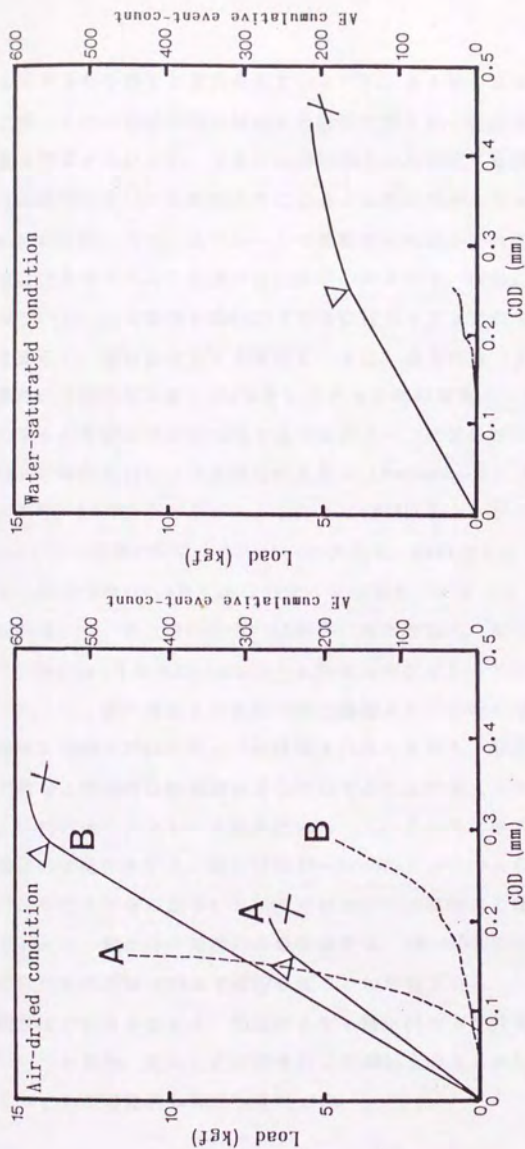


Fig. 3-10. Typical Load-COD diagrams and AE cumulative event-count curves of spruce.

Legend: Same as in Fig. 3-9.

Note: Same as in Fig. 3-9.

のエネルギー分布を表すと考えられている¹¹⁴⁾。A E波のエネルギーは正確には振幅の二乗、または包絡線検波波形の面積等で表すが、分布解析においては、簡便な最大振幅が用いられ、FRPの材料評価にも幅広く適用されている^{115)~125)}。本研究においても振幅分布によるA E特性解析を行った。

Fig.3-11には、スギ、スプルースの気乾材に共通して典型的に観察された、 K_{IC} 値に至るまでのA E振幅分布の推移の例を示す。横軸に各A E波の最大振幅値について、A E変換子の出力（正確にはプリアンプの入力） $1\mu V$ を0dBとして表示し、縦軸にはA E事象数を、また、第3の軸（Z軸）には荷重-COD曲線の比例限度荷重を100%としたときの相対荷重を、それぞれとった。気乾材の場合の振幅分布は図に示す3つのパターンに区分された。すなわち、45dBと70dBに同程度のピークが得られるもの（Pattern I）、45dB付近に大きなピークがあり、70dBの小さなピークを伴って60dB以上のA Eも計測されるもの（Pattern II）、45dB付近に大きなピークがあり、60dB以上のA Eはほとんど計測されないもの（Pattern III）の3パターンである。パターンIは、スギ、スプルーに共通して、 K_{IC} 値の小さい試験片に観察された。 K_{IC} 値が大きくなるに従って、Pattern IIからPattern IIIへと振幅分布が変わっていく傾向があった。すなわち、 K_{IC} 値が大きくなるにつれ大振幅A Eが少なくなっていく。この振幅分布に45dBと70dBのピークが観察されたことから、解放されるエネルギーレベルの異なる微視的な破壊源が2つ存在することが考えられる。

Fig.3-12には、スプルー飽水材について、 K_{IC} 値に至るまでのA E振幅分布の典型的な推移を示す。飽水材は40~60dBのレンジのA Eのみが計測され、70dB付近のピークが確認された気乾材の大部分の試験片とは対称的であった。このことから、飽水材の微視的な破壊現象は、40~60dBのレンジにある、或る単一の微視的破壊様式のみで進行したことが示唆される。しかしながら、木材中を超音波が伝播するとき、気乾材よりも飽水材の方が減衰が著しいという報告^{126)・127)}があり、そのことが飽水材で60dB以上のA Eが計測されなかった原因の1つである可能性も否定しきれない。

3.4.3 破壊じん性とA Eとの関係

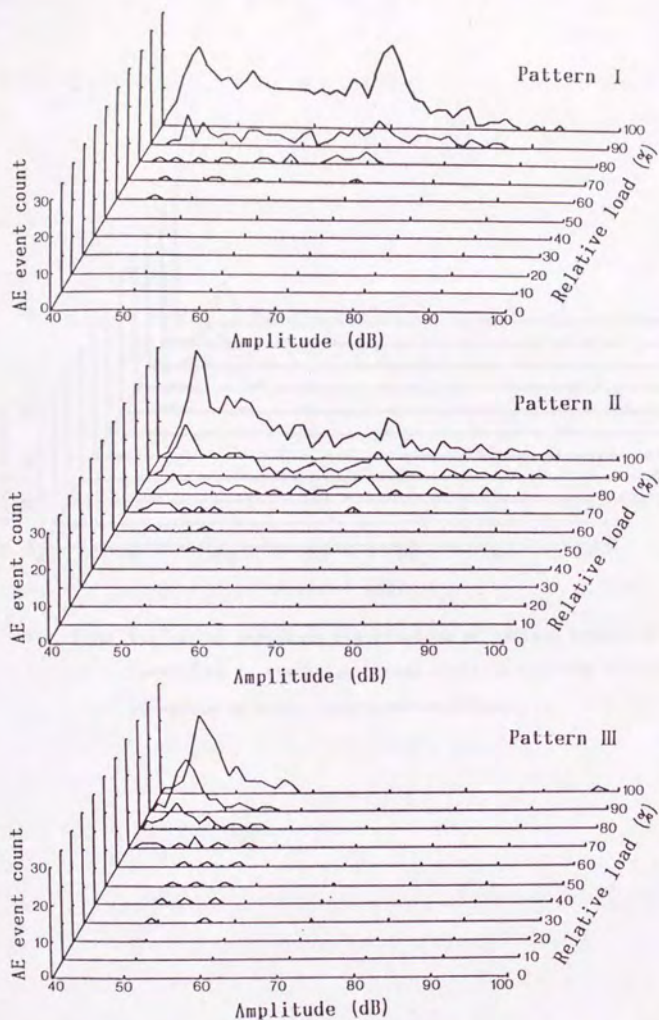


Fig. 3-11. Three patterns of typical AE amplitude distributions at various levels of loading up to the proportional limit in Load-COD diagrams of sugi and spruce in air-dried condition.

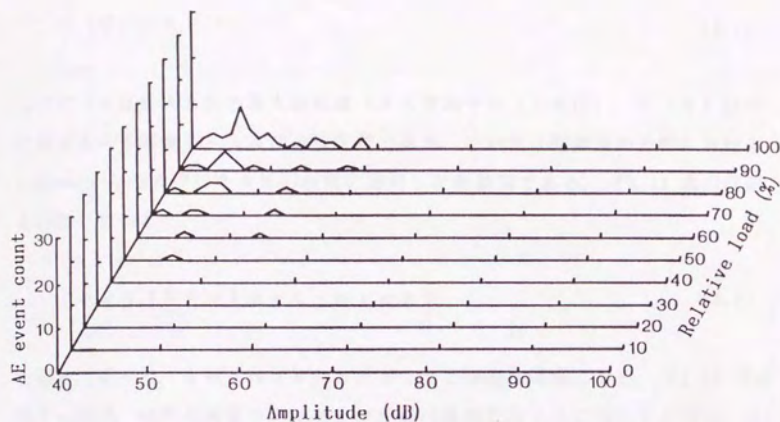


Fig. 3-12. Typical AE amplitude distribution at various levels of loading up to the proportional limit in Load-COD diagram of spruce in water-saturated condition.

一般に A E 事象数と各 A E 波の最大振幅値との間には次の関係式がよく成立する¹²⁹⁾。

$$N(V) = k V^{-m} \quad (3.1)$$

ここで、 V は各 A E 波の最大振幅値 (A E 変換子の出力電圧)、 $N(V)$ は V に対する A E 事象数、 k 及び m は定数である。この式は地震学の分野における Ishimoto-Iida 式¹²⁹⁾ を A E の研究に適用した経験則である。(3.1) 式の両辺を対数でとると、

$$\log N(V) = \log k - m \log V \quad (3.2)$$

を得る。従って、 $\log N(V)$ と $\log V$ とは直線関係にある。(3.2) 式の傾き m 値は、材料の材質や劣化およびき裂の進展状況とよく対応するので、A E の有力なパラメータとなりうる事が知られている¹³⁰⁾。そこで本研究においても振幅分布を定量化するために、 K_{Ic} 値に至るまでに発生した A E について、 V と $N(V)$ を両対数グラフ上にプロットして直線近似することにより m 値を求めた。解析例を Fig. 3-13 に示す。この m 値と K_{Ic} との関係を、 K_{Ic} 値が大きくばらついたスギおよびスプールの気乾材について示す。Fig. 3-14 はスギ、Fig. 3-15 はスプールについてのものである。両樹種とも、 m 値と K_{Ic} 値との間に正の相関があった。 m 値が小さい方が大振幅の A E 波が卓越して発生することを意味することから、 K_{Ic} 値が小さい、すなわち、き裂が進展し易い場合、大振幅の A E 波の発生割合が大きくなり、 K_{Ic} 値が大きい、すなわち、き裂が進展しにくいほど、大振幅 A E 波の発生割合が小さくなっていくことがわかった。振幅分布は破壊様式の違いに対応して変化する¹¹⁴⁾といわれており、本実験の結果より、 K_{Ic} 値の大小によって、初期き裂先端での微視的な破壊様式に違いがあることが予想される。

3.4.4 破壊面の観察

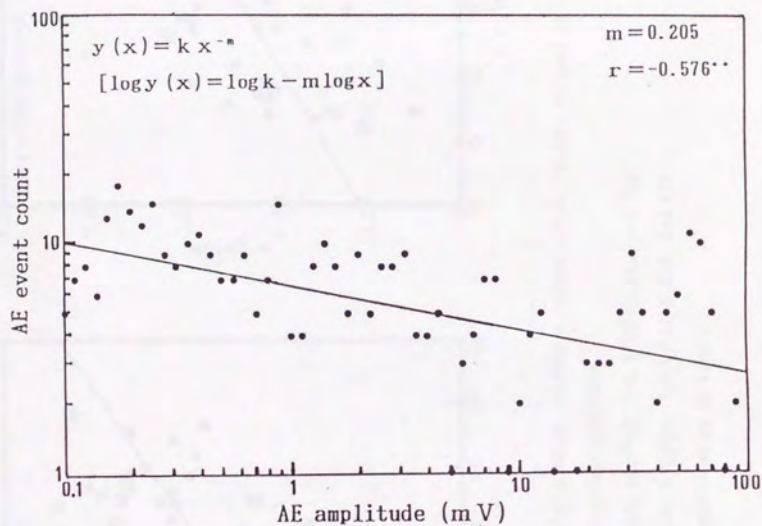


Fig. 3-13. Example of the regression line obtained by a least squares method.

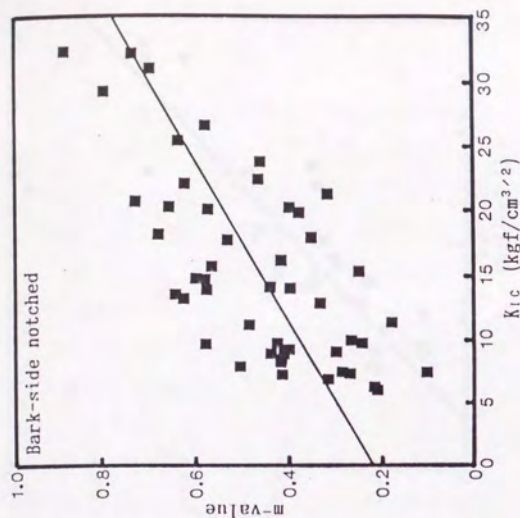
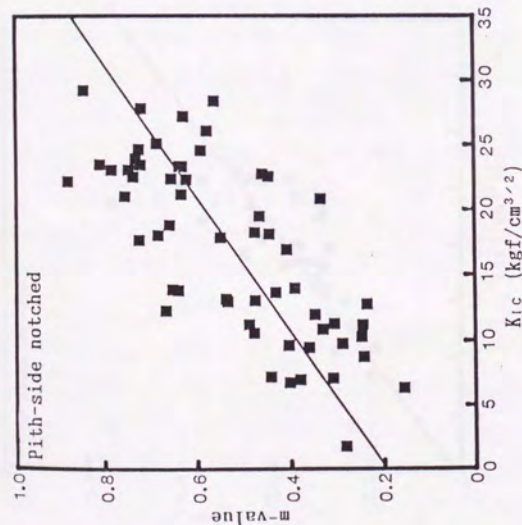


Fig. 3-14. Relationships between m-values and K_{1c} values of sugi in air-dried condition.

Notes: Pith-side notched: $Y=0.0194X+0.194$, $r=0.742^{**}$.

Bark-side notched: $Y=0.0159X+0.216$, $r=0.677^{**}$.

** : Significant at 1% level.

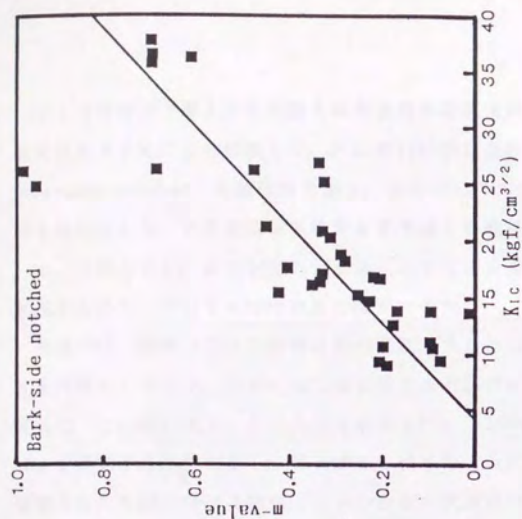
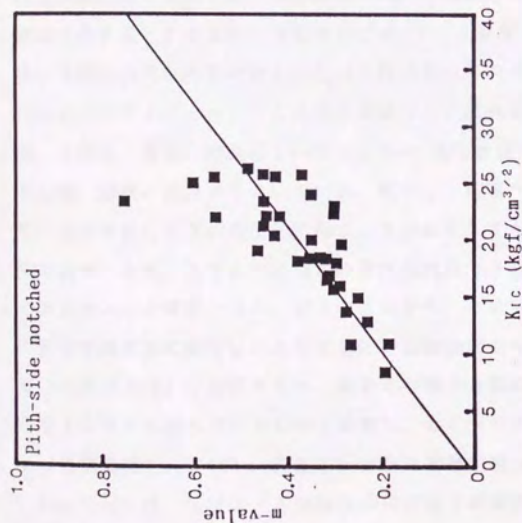


Fig. 3-15. Relationships between m-values and K_{1c} values of spruce in air-dried condition.

Notes: Pith-side notched: $Y=0.0185X+0.0147$, $r=0.721^{**}$.

Bark-side notched: $Y=0.0231X-0.0915$, $r=0.787^{**}$.

** : Significant at 1% level.

カミソリの刃で導入したき裂先端部近傍の破壊後の性状および初期のき裂進展状況をSEMにより観察した。Fig.3-16に示したのは、スブルース気乾材“bark-side notched”の破壊面である。カミソリの刃で導入されたき裂は写真の右下側から入り、その先端が年輪界をやや越えた晩材部にあったことを示している。このように、カミソリの刃を導入してできたき裂は極めて平滑な破面を形成するので、その先端線は容易に識別できた。

本章では、荷重-COD曲線の比例限度、すなわち安定き裂開始点までのAEを対象としており、このAEと破壊面とを対応づけることが主な目的である。従って、この間に発生したAEの発生源をFig.3-16のような破壊面から細胞レベルで特定する必要がある。第2章でも述べたように、材表面でルーペにより観察されたき裂の開始は荷重-COD曲線の比例限度とほぼ同時刻であったが、き裂開始点の目安と考えられたAE事象総数の急増点は材表面で確認されたき裂の開始点よりも若干早い傾向があった。木材の場合、板厚中央部の方がき裂開始が早まるとする見解も報告されており^{2,43)}、板厚中央部で局所的に進行した微小き裂の成長をAEが検出した可能性は充分考えられる。Ashbyら^{2,23)}は、木材の6システムのモードIにおける破壊じん性試験をSEM観察下で行った結果、き裂は、最初、細胞径1～数(a few)個分に値する距離を安定的に成長し、その後、急激に進展するとしている。従って、荷重-COD曲線の比例限度以前に安定き裂の成長が局所的に起こっていたとしても、それは極めて初期の段階であり、スギ、スブルースなどの早材細胞径で3個(約100 μ m)程度の範囲であったことと考察できる。以上のことから、本研究では、荷重-COD曲線の比例限度までに発生したAEは主にき裂開始前のき裂先端での微視的塑性変形(小規模降伏)に由来するが、安定的な微小き裂の成長初期段階での挙動に由来するAEも含んでいたものと推察し、カミソリの刃で導入したき裂先端線よりき裂進展方向に100 μ m程度のレンジの破壊形態を観察することにした。

Fig.3-17には、スブルース気乾材の早材部で典型的に観察された破壊面を示す。写真中の矢印はき裂進展方向を示す。細胞壁を縦、横、または斜めに切断する壁切断破壊¹⁾(transwall failure)が多く観察され、細胞レベルでの破壊面の凹凸が大きい。このような壁切断破壊と細胞境界(壁内)に沿って破壊する壁内破壊¹⁾(intrawall failure)とが混合した形態を示している。壁内破壊

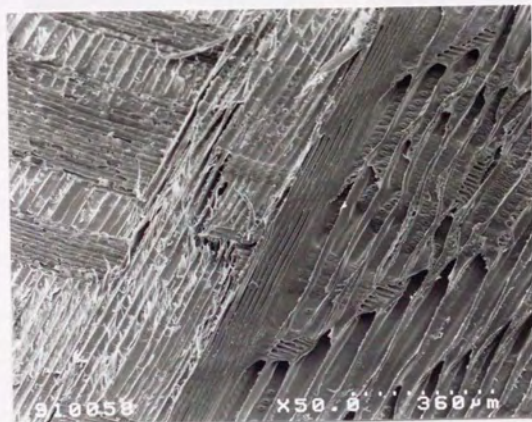


Fig. 3-16. Fracture surface of spruce in air-dried condition.

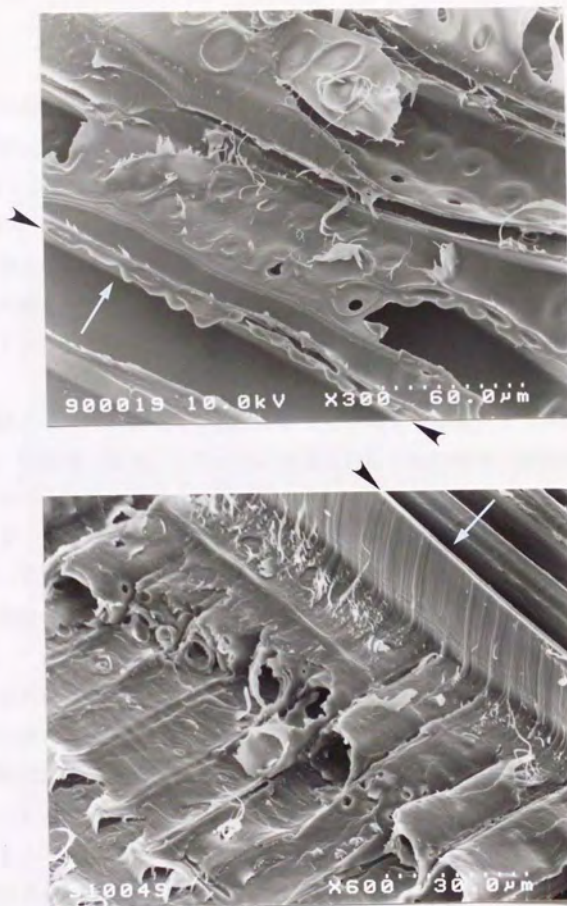


Fig. 3-17. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip of spruce in air-dried condition (early wood).

Notes: ➤ ➤: The initial crack tip.

The arrow indicates the direction of initial crack.

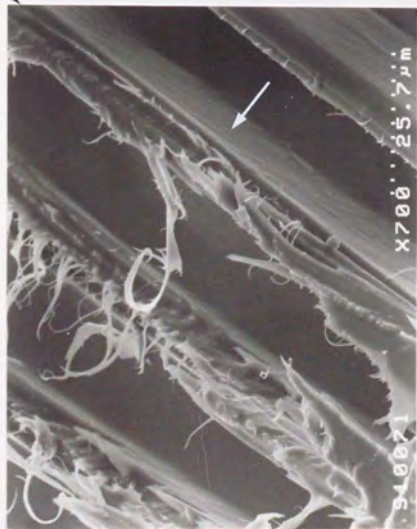
は、S1層内あるいはS1層とS2層との界面で起こっていた。スブルース気乾材の早材部の場合、Fig. 3-17に示したような形態が大部分を占めたが、Fig. 3-18(a)あるいは(b)のような形態も観察された。(a)は K_{IC} 値が小さかった試験片で、(b)は K_{IC} 値が大きかった試験片で、それぞれ観察されたものである。(a)では、き裂が細胞境界へそれることなく、ほぼクラック面の面内で細胞壁の全ての層を切断して進んだ形態(壁切断破壊)を示している。逆に、(b)では、細胞を切断することなく、細胞の境界に沿って進んだ形態(壁内破壊)を示している。

Fig. 3-19はスブルース気乾材の晩材部のものである。写真の左上隅に年輪界が見られる。晩材部の場合、このようにささくれだった形態が一般的であった。

以上スブルース気乾材は、そのA E振幅分布と同様に破壊面の形態に大きなばらつきがあったが、 K_{IC} 値、あるいはA E特性との間に明確な特徴をつかむまでには至っていない。

一方、スギ気乾材の場合、その破壊面と K_{IC} 値との間に、或る関係があった。Fig. 3-20は、"pith-side notched"の年輪内位置10.7%の試験片において典型的に観察された破壊面である。これはスブルース気乾材で主に観察された壁切断破壊と壁内破壊とが混合した形態である。Fig. 3-21は、"bark-side notched"の年輪内位置8.3%の試験片において典型的に観察された破壊面である。Fig. 3-20で示した試験片とは年輪内位置はほぼ同じでき裂進展方向のみが異なる試験片である。この試験片では、壁切断破壊はほとんど観察されず、壁内破壊が支配的でき裂が進展した。Fig. 3-20の試験片の K_{IC} 値は $10.6 \text{ kgf/cm}^{3/2}$ 、Fig. 3-21のそれは $31.2 \text{ kgf/cm}^{3/2}$ であったことから、 K_{IC} 値が小さかった方が壁切断破壊が多く観察されたことになる。このように、スギ気乾材の場合、 K_{IC} 値が小さいほど壁切断破壊が多く観察される傾向が認められた。

Fig. 3-22は、スブルース飽水材のものである。飽水材の場合、そのA E振幅分布と同様破壊形態は一樣であった。すなわち、写真に示したような壁内破壊が最初のき裂先端線に沿ってほぼ全域で観察され、Fig. 3-17の形態が観察されるのは非常に希であった。気乾材では、同じ壁内破壊でもややささくれだった形態(Fig. 3-18(b))であったが、飽水材は、より平滑な破面を形成していた。



(a)



(b)

Fig. 3-18. Fracture surfaces close to the initial crack tip of spruce in air-dried condition (early wood).

Note: Same as in Fig. 3-17.

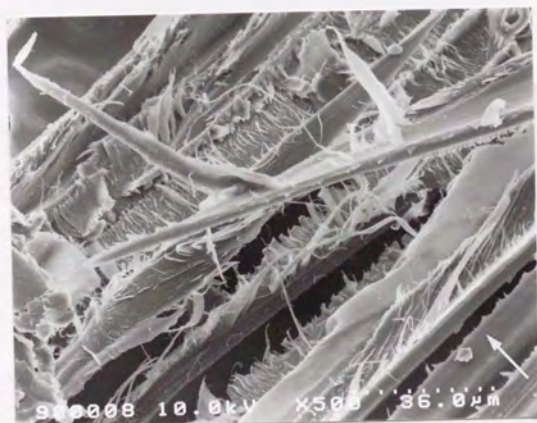
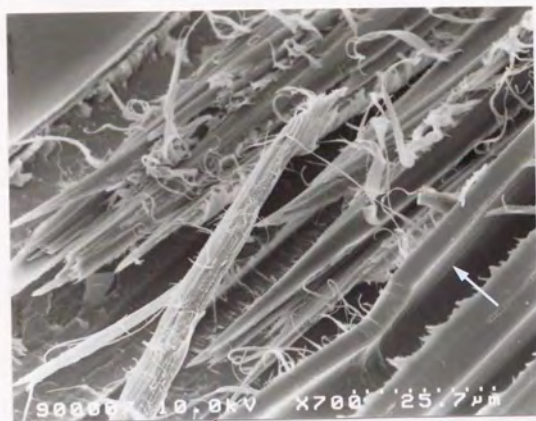


Fig. 3-19. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip of spruce in air-dried condition (late wood).

Note: Same as in Fig. 3-17.

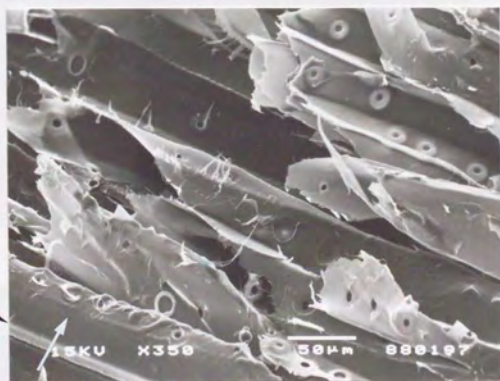
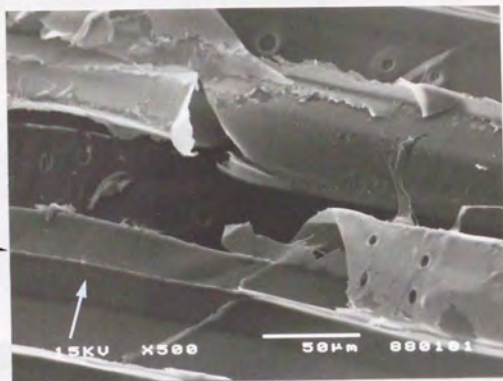


Fig. 3-20. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip of sugi in air-dried condition .

Note: Same as in Fig. 3-17.

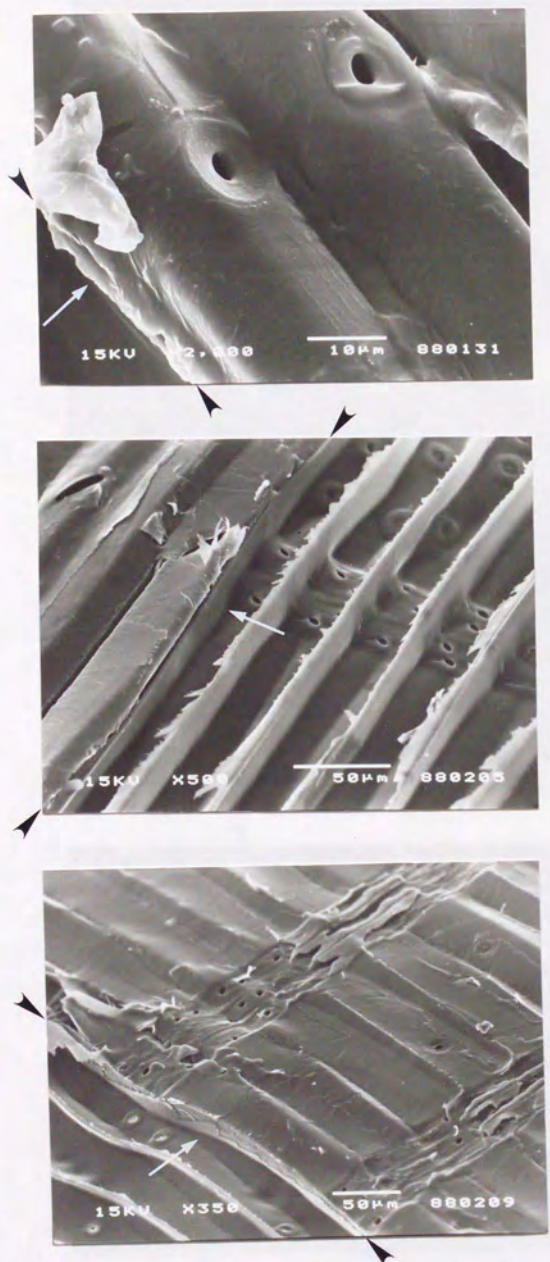


Fig. 3-21. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip of sugi in air-dried condition .

Note: Same as in Fig. 3-17. 69

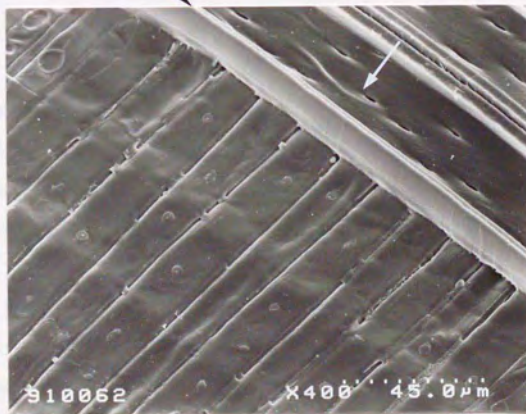
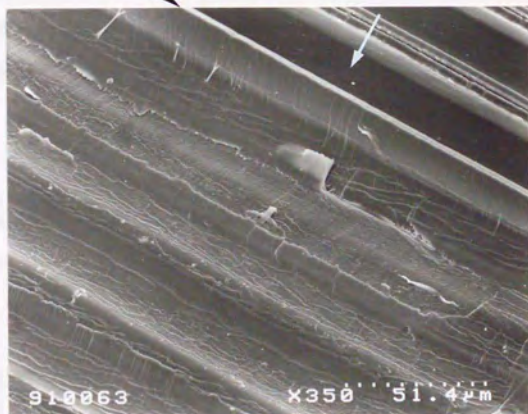
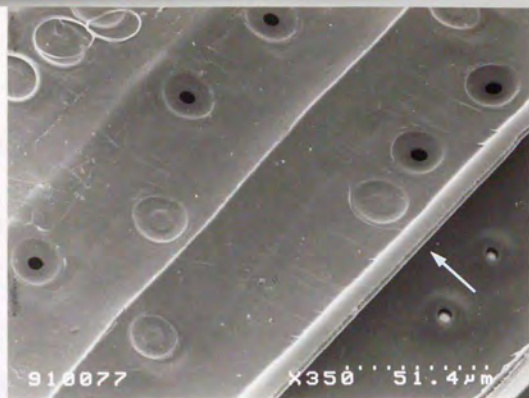


Fig. 3-22. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip of spruce in water-saturated condition .

Note: Same as in Fig. 3-17. 70

3.4.5 破壊形態とm値との関係

3.4.4項で観察されたような破壊形態をFig.3-23で模式的に示すように、次の3つに分類した。

①Type A: 細胞と細胞の界面 (S1層内あるいはS1層とS2層の境界) で起きた破壊形態 (例, Fig.3-18(b))

②Type B: 細胞壁の全層あるいはそのほとんどの厚さに渡って、それを貫いてあるいは横切って切断した破壊形態 (例, Fig.3-18(a))

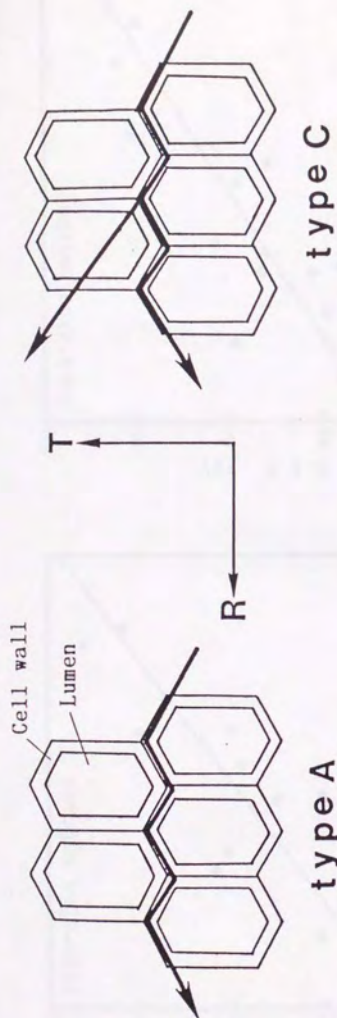
③Type C: Type AとType Bの複合化した形態 (例, Fig.3-17)

ここで破壊形態を定量的に議論するために壁内破壊度 (D.I.F., Degree of Intrawall Failure) を導入する。D.I.F.は次式で与えられる。

$$D.I.F.(\%) = \frac{A + C}{2T} \times 100 \quad (3.3)$$

ここで、T: カミソリの刃で導入した最初のき裂先端線の全長、すなわち、試験片の板厚、A: Type Aが観察された最初のき裂先端線の累積長さ、C: Type Cが観察された最初のき裂先端線の累積長さ、である。D.I.F.は細胞の境界で破壊する度合を表すものと考え、そこで、破壊形態がばらついたスプルーおよびスギの気乾材の各試験片ごとに、最初のき裂先端線に沿って全き裂線長さをSEMで走査し、き裂先端線近傍を3方向から観察することによって、

(3.3)式のAおよびCの値を約10μm単位で計測してD.I.F.を求めた。このD.I.F.とAE振幅分布を定量化した値(m値)との関係を、スギ、スプルーの気乾材それぞれについてFig.3-24およびFig.3-25に示す。測定試料のサンプリングは、試料のき裂先端年輪内位置が均等にばらつくように行った。m値



type A



type B



type C

$$\text{D.I.F. (\%)} = \frac{A+C/2}{T} \times 100$$

Fig. 3-23. Three patterns of microfracture of wood.

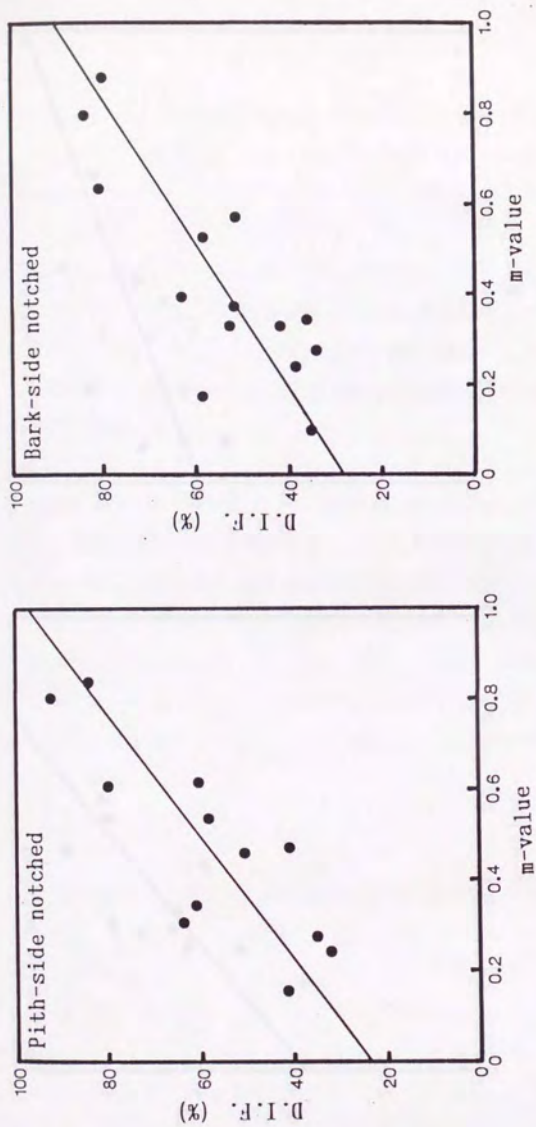


Fig. 3-24. Relationships between D.I.F. and m-value of sugi in air-dried condition.

Notes: Pith-side notched: $Y=73.3X+23.7$, $r=0.824^{**}$.

Bark-side notched: $Y=61.5X+23.7$, $r=0.820^{**}$.

** : Significant at 1% level.

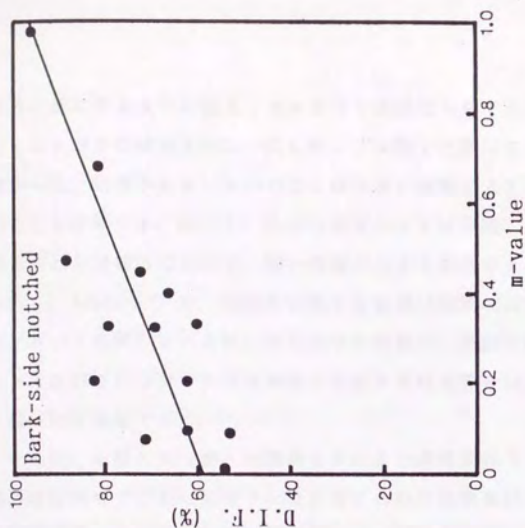
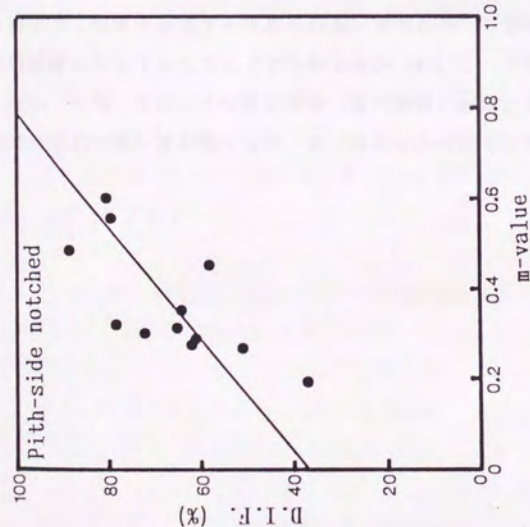


Fig. 3-25. Relationships between D.I.F. and m-value of spruce in air-dried condition.

Notes: Pith-side notched: $Y=79.6X+37.2$, $r=0.713^{**}$.

Bark-side notched: $Y=37.5X+53.6$, $r=0.769^{**}$.

** : Significant at 1% level.

は K_{Ic} 値に至るまでに発生したAEより求めたものである。スギ、スプルースとも右上がりの傾向を示し、同じサンプル数で比較してスギの方が相関係数が高かった。 m 値が大きいということは小さい振幅のAEの発生数が相対的に多いことを意味する。従って、小さい振幅のAEが卓越した場合、その発生源と考えられた破壊面において、壁内破壊の占める割合が大きくなったと結論づけられる。Ashbyら^{4,5)}は、細胞を切断する破壊は細胞境界での剥離に比べてじん性が高いと考察しているが、本研究でも同様に、細胞と細胞の界面での破壊によって放出されるエネルギーは細胞を切断する破壊のそれよりも小さいと考えることが統一的に理解できる。

さらに、 m 値と K_{Ic} 値との関係もまた正の直線関係であったことから、き裂進展開始時までに主に形成されたと考えられた破壊面において壁内破壊の占める割合が大きくなると、 K_{Ic} 値もそれにつれ大きくなることが明らかとなった。

き裂の開始以前にき裂先端近傍で発生する壁内破壊は、き裂先端の応力集中を緩和する効果を及ぼすと考えられる。すなわち、き裂先端が停止した状態で壁内破壊が発生することによりき裂先端が“鈍化”し、そのために K_{Ic} 値は大きくなる。一方、そのような緩和現象（壁内破壊）が起こらない場合には、き裂先端の応力の集中度が高くなり、 K_{Ic} 値は小さくなると考えられる。

3.5 結論

本章では、破壊じん性とAEとの関係、および、AEとその発生源での細胞レベルでの破壊形態との関係を明らかにすることを目的とした。

気乾材（スギ、スプルース）と飽水材（スプルース）のTRき裂進展システムを用いて、き裂先端の放射方向における年輪内位置を変えて破壊じん性試験を行い、木材の破壊じん性に対するき裂先端の組織構造および含水率の影響について、き裂の開始まで、あるいは初期の進展過程で発生したAEの計測およびSEMによる破壊形態の観察により検討し、以下の結果を得た。

(1) き裂の開始を臨界点として求めた K_{Ic} 値は、気乾材の場合、き裂先端位置およびき裂進展方向（木裏→木表、木表→木裏）によって大きく異なった。き裂先端が早材部にある場合、き裂先端からき裂進展方向前方の晩材部までの距離が近いほど K_{Ic} 値は大きく、また、き裂先端が晩材部にある場合、 K_{Ic} 値は相対的に小さくなった。き裂先端の年輪内位置が同じでもき裂進展方向により K_{Ic} 値が異なったことから、単にき裂先端の組織構造のみに影響されているのではないことが示唆される。これについては第4章で議論する。

一方、飽水材の場合、き裂先端位置、き裂進展方向との間に関係が認められず、ほぼ一定値を示した。

(2) K_{Ic} 値に至るまでに発生したAEの振幅分布は、気乾材では2つのピーク（45dB, 70dB）が認められたが、飽水材では単一のピーク（45dB）のみが存在し、大振幅のAEはほとんど計測されなかった。このことから、気乾材の場合、解放されるエネルギーレベルの異なる微視的な破壊源が2つ存在したのに対し、飽水材の場合、或る単一の微視破壊様式のみが存在したと仮説した。

K_{Ic} 値に至るまでに発生したAE振幅分布が試験片によって大きくばらついた気乾材において、AEの振幅分布がべき乗則分布形を示すことに着目して求めた指標（ m 値）と K_{Ic} 値との間に正の直線関係が認められたことより、 K_{Ic} 値が小さいほど大振幅AE波が卓越して発生することが明らかとなった。

(3) 荷重-COD曲線の比例限度までに計測されたAEの発生源と考えられた最初のき裂先端線からき裂進展方向へ100 μ m程度のレンジの破壊面をSEMで観察した。気乾材では壁内破壊と壁切断破壊との複合化した形態が一般的であったが、飽水材では壁内破壊が極端に支配的な形態を示していた。このことは(2)で立てた仮説の裏付けとなる。すなわち、AE振幅分布で45dBのピークは主に壁内破壊に由来し、70dBのピークは主に壁切断破壊に由来すると考えることができよう。

破壊形態を定量的に議論するために"壁内破壊度"(D.I.F., Degree of Intrawall Failure, (3.3)式)を導入した。D.I.F.は細胞の境界で破壊した割合を表すものとする。破壊形態がばらついた気乾材についてD.I.F.とm値との関係を調べた結果、正の直線関係があった。このことから、小さい振幅のAEが卓越した場合、その発生源と考えられた破壊面において壁内破壊の占める割合が大きく、大振幅AEが卓越した場合、壁切断破壊の割合が大きくなると結論づけた。また、m値と K_{IC} 値との関係もまた正の直線関係であったことから、き裂進展開始時までに主に形成された破壊面において壁内破壊の占める割合が大きくなると、 K_{IC} 値もそれにつれ大きくなることが明らかとなった。

第4章 破壊じん性値の年輪内変動の有限要素法による解析

4.1 はじめに

木材の接線方向に一樣な引張力が加わっているとする。細胞壁自体の材質（ヤング率）が年輪内で均一で、しかも細胞の形態変化が無ければ、細胞壁実質部分での応力は年輪内で一定である。しかしながら、早材仮道管は晩材と異なり壁厚が小さく細胞径が大きいため、細胞形態の弾性的変形が起こり易い¹³¹⁾ ¹³⁵⁾。このために早材と晩材の細胞壁実質部分での応力に違いが生じる¹³²⁾ ¹³⁶⁾。すなわち、次年度に形成された年輪との境界に近い晩材細胞壁での応力が一番大きく、前年との年輪界に近づくにつれてその応力は小さくなっていく。このように考えると、前章で検討したTRき裂進展システムの場合、き裂先端が次年度との年輪界に近づけば近づくほど破壊じん性値は小さくなるはずである。前章における年輪内位置と破壊じん性値との関係（Fig.3-5,3-7）をみると、“bark-side notched”では年輪内位置が増加するにつれ K_{IC} 値は低下したが、“pith-side notched”の早材部では逆に増加する傾向を示している。このことから、前章での K_{IC} 値の大きな変動に対して、き裂先端位置での細胞の形態変化のし易さという細胞レベルでの要因以外にも、もっとマクロな要因が特に早材部において働いていたものと考えられる。著者は、このマクロな要因として、き裂先端の年輪内位置およびき裂進展方向の違いによる応力分布の変化があるので、その変化によってき裂先端での応力集中度が異なったことが K_{IC} 値のばらつきの主な原因ではないかと考えた。

き裂先端近傍の応力を求める方法として有限要素法は有力である。近年、コンピュータの大型化・高速化に伴い、有限要素法は、様々な分野で広汎に用いられてきた。木材科学の分野においても、破壊力学的手法を取り入れた有限要素法解析は数多く試みられており¹³⁷⁻¹⁴⁶⁾、き裂の開始あるいは伝播のメカニズム等に関する研究が行われている。増田¹⁴³⁾は、有限小領域理論を提唱¹⁴⁷⁾し、き裂進展開始時の荷重の予測方法を検討している。それによると、有限小領域として繊維方向1mm、繊維に垂直方向0.4mmの長方形領域を用い、有限小領域の平均応力がある破壊条件に達したとき破壊（き裂の開始）が生じるとし、

この考え方は小試験体および実大材の切欠き材、無欠点材双方に適用しても有効であるとしている。しかしながら、木材の材料としての特性を大きく支配するファクターである“不均質性”（例えば一年輪内での材質のばらつき）を考慮した研究は、大釜ら^{22,136)}が横引張りにおける細胞壁内の応力分布状態を計算した例、あるいは、Cramerら^{140,142)}やZandbergsら¹⁴⁶⁾による節を含む部材での応力状態を計算して破壊のシュミレーションを行った例以外には見あたらない。

本章では、前述した予想を検証することを主な目的とし、き裂先端の年輪内位置およびき裂進展方向により K_{Ic} 値がどのように変動するかを有限要素法により解析した。その結果を踏まえ、前章における破面解析結果およびA E計測結果と対比させた。

4.2 解析方法

破壊じん性値が、き裂先端の年輪内位置およびき裂進展方向の違いに由来する応力分布の変化にどのように影響されるかについて、有限要素法による数値解析を行う。解析には東京大学大型計算機センターライブラリーの総合構造解析プログラム (HITAC ISAS II) を利用し、スーパーコンピュータ HITAC S-820によりおこなった。

Fig. 4-1で模式的に示すように、前章で扱った試験片の斜線の部分を同図のように分割する。要素数は4534個、グリッド数は4483個である。線分ABのT方向の変位を固定し、線分DEのT方向に強制変位を与え、2次元平面問題の弾性解析を行う。

Fig. 4-2に示すように、年輪幅は5mm (材幅25mm) とし、それを10分割し、それぞれの材質 (弾性定数、せん断弾性係数、ポアソン比) を異ならせる。そして、材質をR方向に徐々にずらしていくことによって、き裂先端の年輪内位置の違いを再現しようとするものである。材質の各ファクターのうち、T方向弾性定数 (E_T)、R方向弾性定数 (E_R) およびL方向弾性定数 (E_L) は実測によって求め、せん断弾性係数 (G_{TR}) およびポアソン比 (ν_{RT} , ν_{LT} , ν_{LR}) は文献値より推定することとした。また、1年輪を10分割した各部位の引張強さ (T方向: σ_{1T} , R方向: σ_{1R}) も実測により求める。そして、き裂先端 (Fig. 4-1, B) に接している1個の要素が引張強さに達した時を臨界点とし、そのときの公称応力 (Fig. 4-1, 線分DEでの応力) を求め、(2.1) 式より K_{IC} 値を算出する。この要素は一辺0.125mmの正方形であり、針葉樹仮道管早材部の細胞径を0.04mmとすると、一辺の長さは細胞約3個分に相当する。これは、前章において、き裂進展開始時まで発生したAEの発生源と推察された部位のき裂進展方向における距離と一致するように設定したものである。

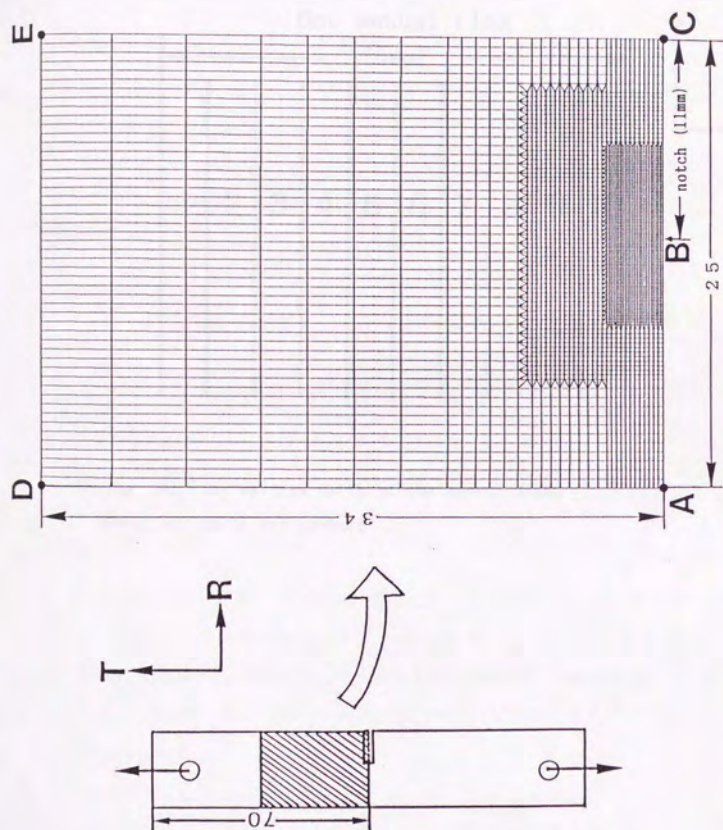


Fig. 4-1. Finite element meshes for Single edge notched specimen
(unit:mm).

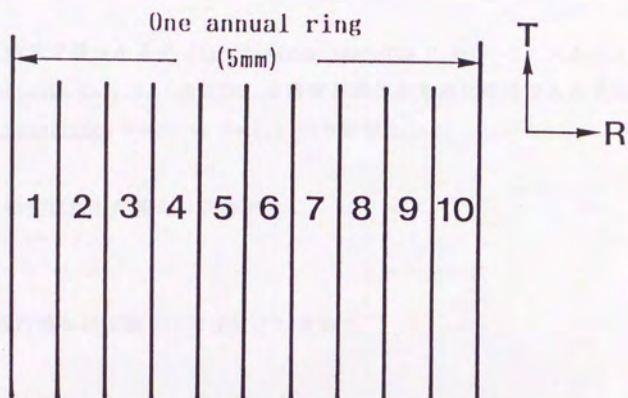


Fig. 4-2. The divided parts of one annual ring.

Note: All parts are numbered.

4.3 実験

4.3.1 樹種

樹種は、前章で扱ったスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) とスプルース (*Picea sitchensis* Carr.)、および、早晚材の移行が急激な樹種であるアカマツ (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) の3樹種とした。

4.3.2 弾性定数の年輪内分布の測定

(a) E_L :

E_L の年輪内分布は振動リード法により求めた。

(b) E_T および E_R :

一般に、材料中の音の伝播速度は次式で与えられる¹⁴⁹⁾。

$$v = \sqrt{E / \rho} \quad (4.1)$$

ここで、 v : 音速、 E : 動的ヤング係数、 ρ : 密度である。本実験では超音波パルス伝播法により音速を測定し、(4.1) 式より E_T 、 E_R を求めることにした。

試験片寸法は、1 (T) \times 1 (R) \times 10 (L) mm (T方向測定用、以後、T-specimenと呼ぶ) および 1 (R) \times 5 (T) \times 5 (L) mm (R方向測定用、R-specimen) とした。T-specimen、R-specimenとも、前章で行った破壊じん性試験 (アカマツも同様にして行った) で対象とした一年輪内で、前年度との年輪界付近の早材から次年度との年輪界付近の晩材まで放射方向に連続的に木取りした。試験片は、20℃、65% RHの雰囲気中で十分に調湿した。

音速の測定には超音波探傷装置 (東京計器、Ultrasound Tester SM95) を用いた。測定は試験片の表面にセロハンテープを貼り、探触子との間に白色ワセリンを塗布して行った。セロハンテープの厚さは補正した。

Fig. 4-3には、スギ、スプルースおよびアカマツにおける、比重と弾性定数 (

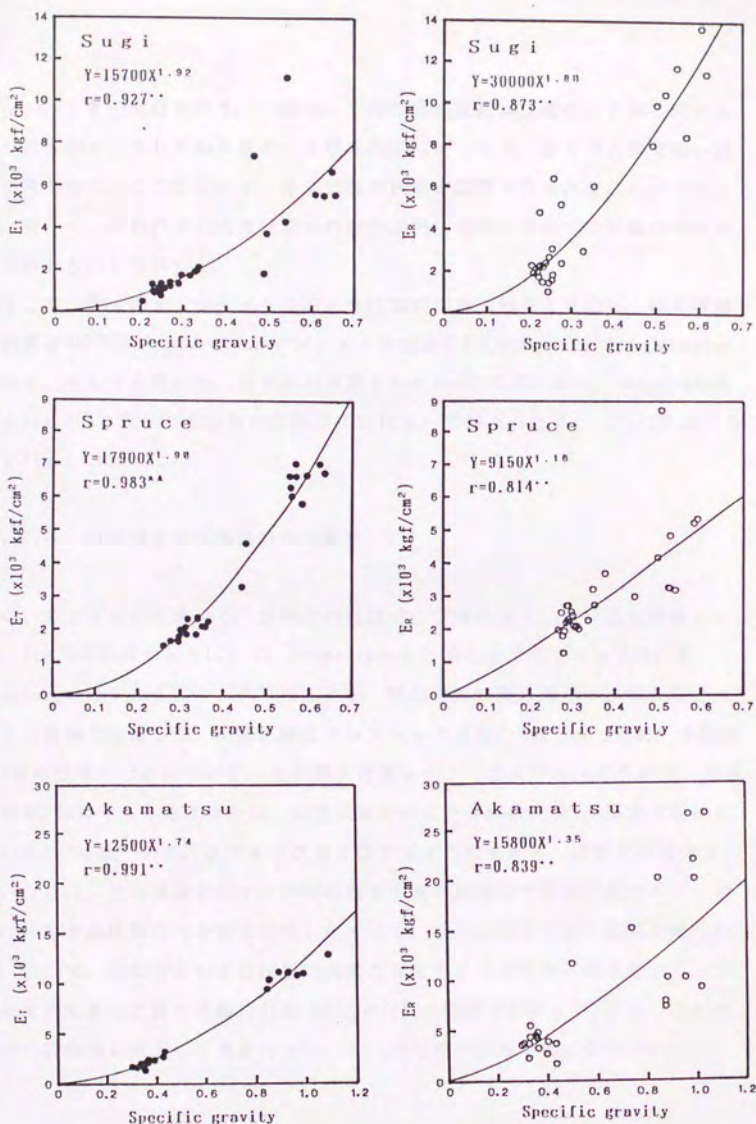


Fig. 4-3. Relationships between the elastic moduli and the specific gravity.

E_T , E_R) との関係を示す。一般に、木材の弾性定数は比重のべき乗で表せる⁽¹⁰⁹⁾ことから、それぞれ比重のべき乗で回帰したところ、全ての条件で高い相関が得られた。ここにおいて、弾性定数が比重の関数で表されることがわかった。従って、年輪内での比重分布がわかれば弾性定数についての年輪内分布も得られるものと考察した。

そこで、軟X線デンシトメトリにより比重の年輪内分布を求めた。軟X線照射装置はSOFTEX Type Kを、デンシトメータはJOYCE LOEBL Microdensitometer 3CSを、それぞれ用いた。得られた結果をFig. 4-4に示す。また、Fig. 4-4の結果をFig. 4-3で示したおのの回帰式に代入して得られた E_T , E_R の年輪内分布をFig. 4-5に示す。

4.3.3 引張強さの年輪内分布の測定

σ_{T1} および σ_{R1} を求める。試験片の形状および寸法は4.3.2項と同様とした。Fig. 4-6に示すようにして、T-specimenでは真ちゅうのブロックを、R-specimenではアルミニウムのブロックを、それぞれ試験片のつかみ部としてエポキシ樹脂で接着した。引張試験はクロスヘッド速度0.5mm/minで行い、木破率100%の試験片のみについて、その最大荷重より σ_{T1} および σ_{R1} を求めた。なお、木破率100%であった試験片は、引張試験を行った全試験片の1/4程度であった。

Fig. 4-7には、スギ、スプリースおよびアカマツにおける、比重と引張強さ(σ_{T1} , σ_{R1}) との関係を示す。木材の強さもまた比重のべき乗で表せる⁽¹⁰⁹⁾ので、それぞれ比重のべき乗で回帰したところ、全ての条件で高い相関が得られた。ここで、引張強さもまた比重の関数で表せることが分かったことから、すでに求めてある比重の年輪内分布 (Fig. 4-4) の結果をFig. 4-7中に示したおのの回帰式に代入して求めた σ_{T1} , σ_{R1} の年輪内分布をFig. 4-8に示す。

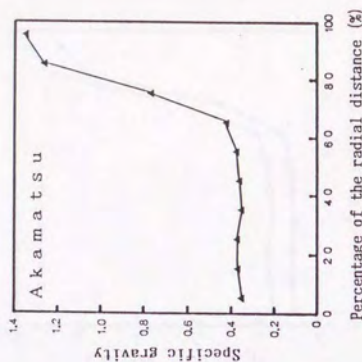
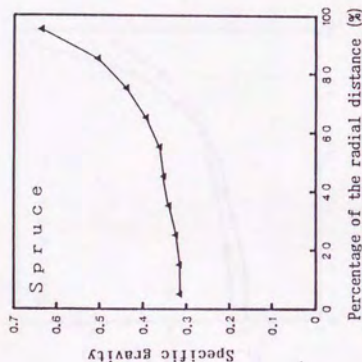
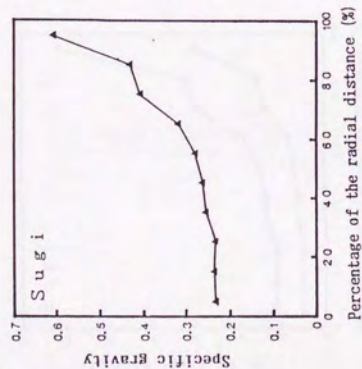


Fig. 4-4. Distributions of the specific gravity in a single annual-ring.

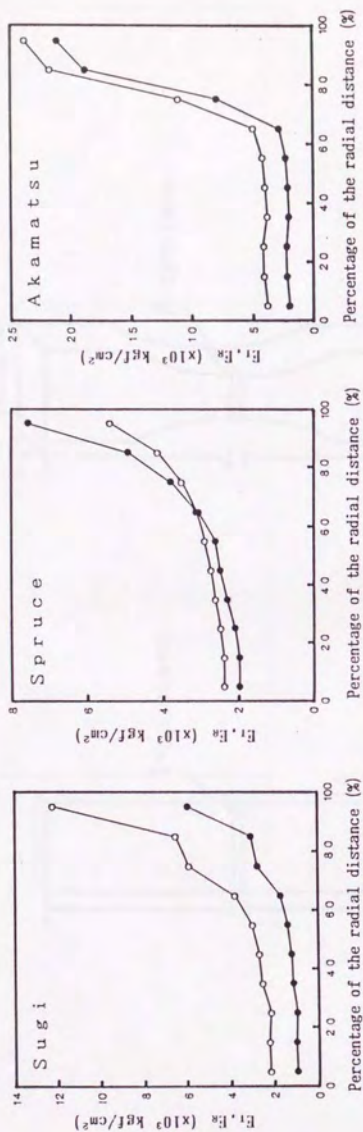


Fig. 4-5. Distribution of the predicted elastic moduli in a single annual-ring.

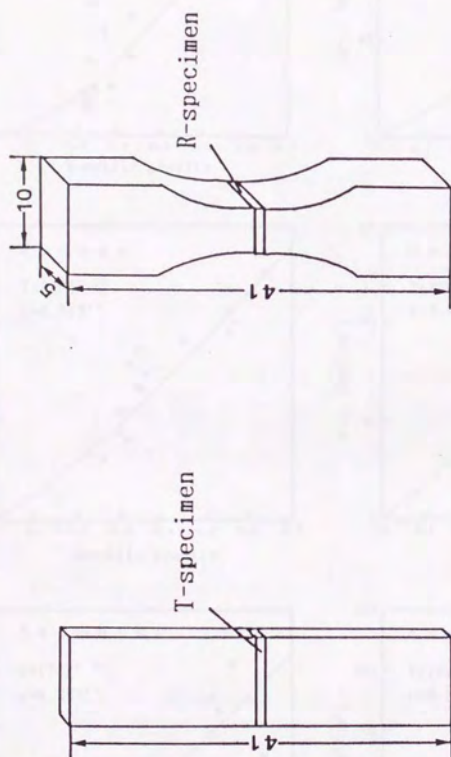


Fig. 4-5. Specimens for tension test (unit:mm).

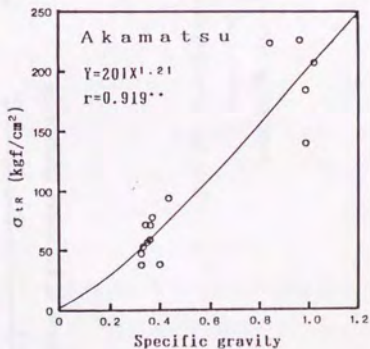
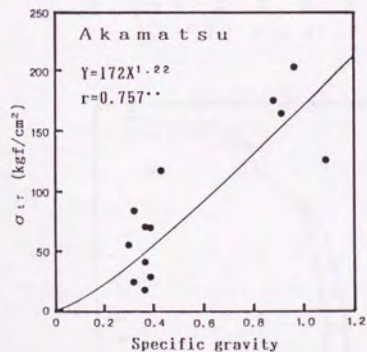
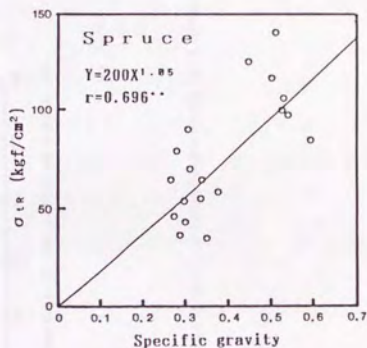
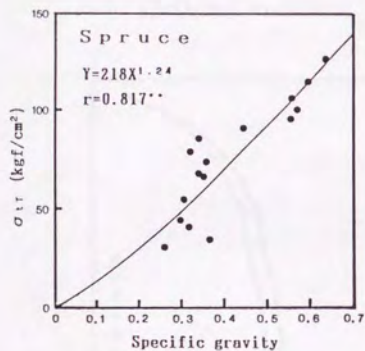
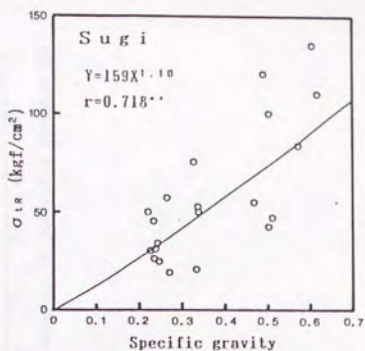
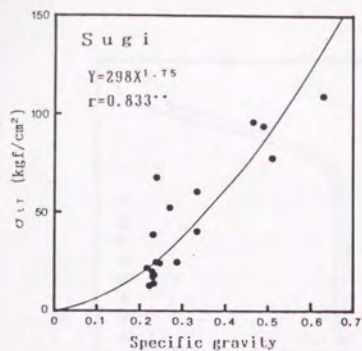


Fig. 4-7. Relationships between the tensile strength and the specific gravity.

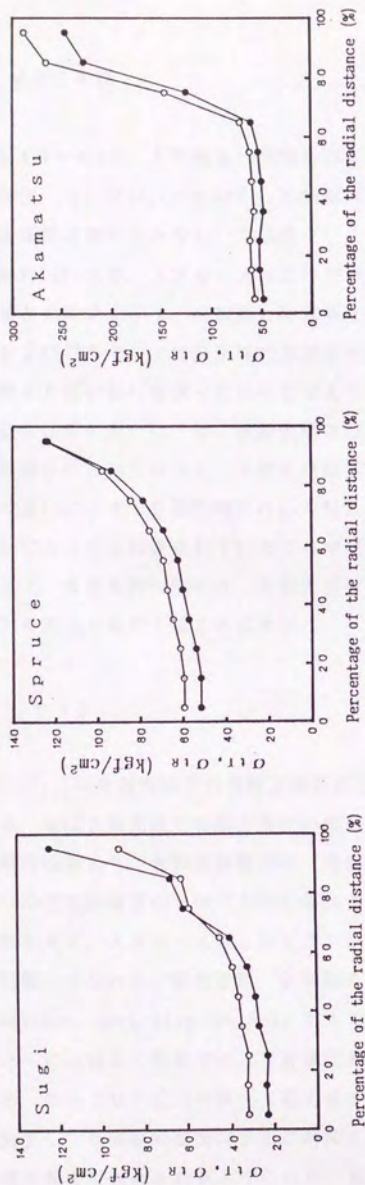


Fig. 4-3. Distributions of the predicted tensile strength in a single annual-ring.
 Legend: ●: σ_{11} , ○: σ_{1R} .